

分类号 _____

密级 _____

UDC _____

编号 _____

中国科学院研究生院 硕士学位论文

太阳能电池、组件和户外光伏系统的测试研究

(宋文祥)

指 导 教 师 _____ 沈辉 教授（博士）中山大学

申请学位级别 _____ 硕士学位 学科专业名称 _____ 热能工程

论文提交日期 _____ 2006. 6 _____ 论文答辩日期 _____ 2006. 6. 7

培 养 单 位 _____ 中国科学院广州能源研究所

学位授予单位 _____ 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 _____ 莫 党 （教授）

摘 要

随着全球光伏市场的快速发展,光伏产品的应用越来越广泛,太阳电池、组件和户外系统的测试也随之越来越重要。文章以此为核心,首先介绍了太阳电池的标定、常规组件和户外系统的测试原理、方法和设备,其中针对市场上新出现的高效率单晶硅太阳电池组件进行测试研究,发现采用一般的市售短脉冲单次闪光测试仪将产生较大测量误差,通过对 NREL 和 Sandia 实验室标定的标准参考组件进行对比测量和模拟研究,提出了解决方法;其次针对国内外对户外光伏系统测量研究较少的现状,研制出一种户外光伏阵列测试系统,实现 I-V 曲线和关键参数(V_{oc} I_{sc} V_{mp} I_{mp} P_{max} 等)的采集,从测试原理、设计到运行和测试的精确性都进行了详细研究和描述;最后利用该测试系统对小型户外光伏系统进行评价,自行设计小型 Siemens 和 SunPower 光伏系统各一套,对其进行全天候测试,通过比较 FF 发现强光下 SunPower 系统性能明显优于 Siemens 系统,通过比较弱光下 I_{sc} 发现光强上升和下降阶段 Siemens 系统和 SunPower 系统各自在短时间内略显优势,由于光强上升和下降阶段对于全天发电量影响较小,整体来讲 SunPower 高效电池还是优于 Siemens 电池,通过 SunPower 电池的特殊结构对该现象可以得到初步解释,同样的研究方法可以用于评价其他类型的电池组件。

关键词:太阳电池、组件、光伏系统、测试

Abstract

With the development of the global PV market, More and more PV products are under application .The testing of solar cell, solar module as well as solar systems become more and more important .This thesis will focus on this issue ,First the calibration of solar cells, the testing principle and method together with the equipments of standard modules and the outdoor systems will be described here. Some of the new high efficiency solar modules were tested by common flash tester but severe testing error appears. After the simulation and testing of reference modules from NREL and Sandia, a solution will be proposed to resolve this problem. Considering the shortage of research of outdoor testing equipments, an outdoor testing system was developed and the I-V curve can be traced out as well as the key parameters such as open circuit voltage, the short circuit current, the maximum power, the current and voltage at the maximum power and so on, From the testing principle and design to the running condition and accuracy will be described. The last part of this thesis is an example of evaluation of solar systems by this testing system, two kind of solar systems including Siemens and SunPower were installed and tested at the same time for a whole day. The SunPower system represents a higher output after the compare of FF under high light intensity while Siemens system has higher I_{sc} value under the light ramp up stage and SunPower system has a higher I_{sc} value under the light ramp down stage. Anyway the low light intensity time will only take a small part of the whole day radiation so the SunPower system is still superior to the Siemens system. Similar research can be done to evaluate other kinds of solar systems.

Key words: solar cell,module, PV system, test

目 录

摘 要	1
第一章 绪 论	5
1.1: 光伏市场发展状况	5
1.2 常规太阳电池和组件制造工艺	6
1.2.1 晶体硅太阳电池制造工艺	6
1.2.2 晶体硅电池封装工艺	8
1.3 太阳电池和组件生产设备	10
1.4 本文研究的重点	10
第二章 太阳电池和组件测试	11
2.1 标准参考光谱	11
2.1.1 标准参考光谱介绍	11
2.1.2 光谱不匹配	12
2.1.3 光谱不匹配修正	14
2.2 太阳电池的标定	15
2.3 常规太阳电池和组件室内测试	16
2.2 高效太阳电池和组件室内测试	18
2.2.1 电容效应对测试的影响	18
2.2.3 解决方法	22
第三章 户外光伏系统测试	25
3.1 户外光伏系统测试原理	25
3.2 测试系统研制	26
3.2.1 测试系统设计	26
3.2.2 硬件和软件配备	26
3.2.3 系统操作、调试及运行	30
第四章 户外测试结果分析及光伏系统性能评价	33
4.1 测量准确性分析	33
4.1.1 V_{oc} : 采集数据在光强较弱时误差较大	33
4.1.2 I_{sc} : 采集数据准确	34
4.1.3 P_{max} , V_{mp} , I_{mp}	35
4.2 光伏系统性能评价	35
4.2.1 运行情况	35
4.2.2 强光下输出性能比较	36
4.2.3 弱光下输出性能比较	38
第五章 结 论	40
攻读硕士阶段发表文章	41

致 谢	42
附 录	43

第一章 绪 论

1.1: 光伏市场发展状况

2004 年，全球光伏产业产量突破 1GW 大关^[1]，大约生产了 1200MWp 的光伏组件，产值达到 58 亿欧元。2001-2005 年，光伏产业年增长率超过 40%，成为目前增长最快的一个产业。里昂证券作的一份投资报告预测光伏产业将从 2004 年的 58 亿欧元增加到 2010 年的 250 亿欧元，相应年度产量 5.3GWp。

目前的太阳能电池技术已经十分成熟，产品性能稳定。大多数光伏组件生产厂家都能够保证 20 年的使用寿命，传统能源价格的攀升和电网存在断电危险的可能性成为光伏产品受青睐的一个原因。

目前，90% 以上的光伏产品采用晶体硅电池制造技术，采用这种技术的优点是可以购买到整条生产线，装机和试运行时间比较短，投资回收风险较小。不过目前比较敏感的一个问题是硅材料，硅材料生产商没有跟上光伏产业迅速发展的步伐，导致硅材料日趋紧张。目前除了硅材料供应商大力扩产之外，光伏公司加速使用更薄硅片的步伐，生产效率更高的电池，以是减少每峰瓦的硅材料消耗，另外新的薄膜电池生产工艺开始进入市场，避免使用大量硅材料。目前主要集中在 a-Si, CdTe 和 CIGS 薄膜电池三方面。

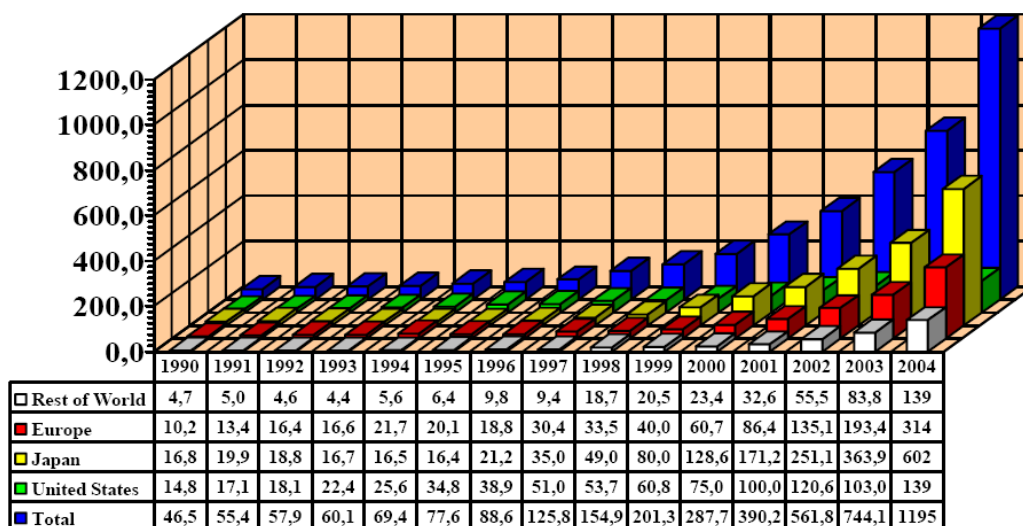


图 1.1 1990-2004 年光伏产业发展

图 1.1 给出了全球 1999-2004 年的销售量，世界市场呈指数状增长，吸引了大量投资，2004 年德国取代日本成为需求量最大的国家。整个光伏产业在 2004

年增长 58.5%。几乎一半的增长源于德国市场的膨胀，从 2003 年的 153MW 增长到 2004 年的 363MW，占据欧美需求量 88% 的份额。2001 至 2004 年欧盟的光伏安装量几乎已翻 3 倍，2004 年底装机总量已接近 1GW。80% 的安装量在德国。西班牙和澳大利亚已经成倍增加其安装量。卢森堡公国也雄心勃勃想达到人均安装量 58.5Wp 的目标，成为世界第一。如果欧盟都如此仿效，可以达到年装机量 26.4GWp，相当于 2002 年欧盟能源消费总量的 0.93%。

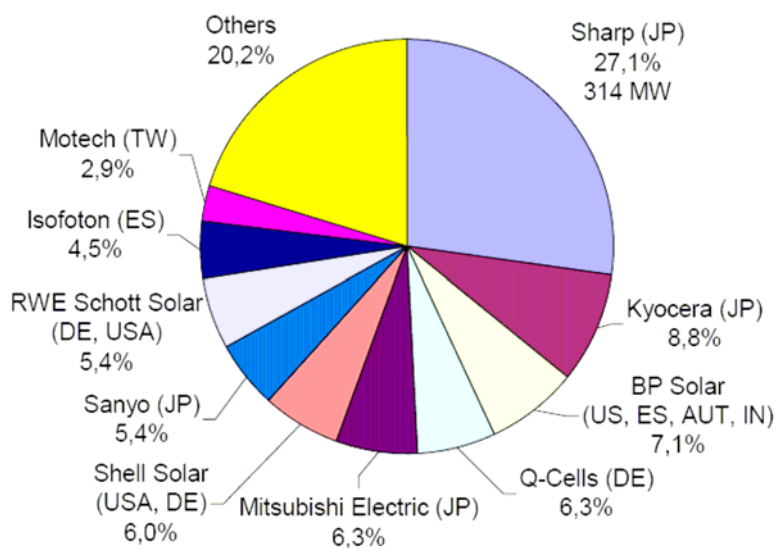


图 1.2 2004 年全球 10 大光伏公司

图 1.2 给出了 2004 年全球光伏产业前 10 位产量最大的公司。相对于 2003 年，日本在 2004 年新安装了 268.8MW 光伏阵列，增长 25.5%。其中 85% 是居民并网光伏阵列，2004 年累计达到 834MW，而全日本的光伏安装量是 1132MW。同时，日本光伏产品出口量达到 318.8MW，其中 224MW 出口到欧洲。日本光伏制造商的占据全球份额的 50% 以上，全球前 10 名的公司里有 3 家在日本。夏普 2004 年占据全球市场的 27%。10 家大型企业占据全球份额的 79.7%，其余份额由是 30 家不同的小公司占据。

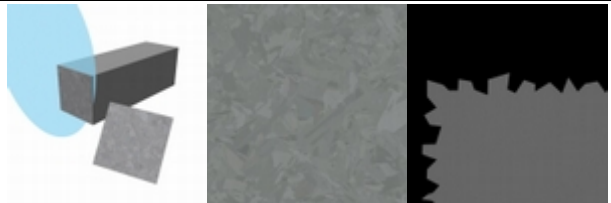

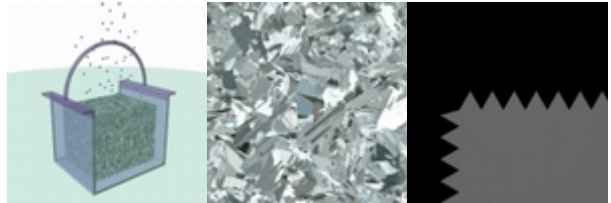
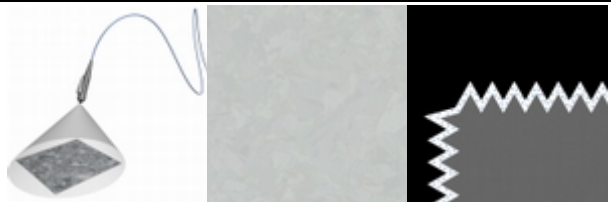
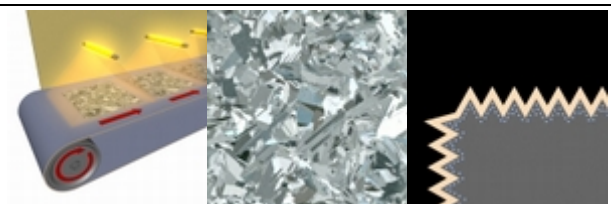

1.2 常规太阳电池和组件制造工艺^[2]


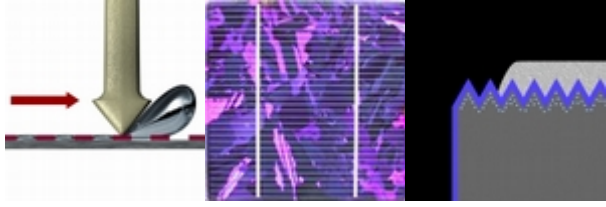
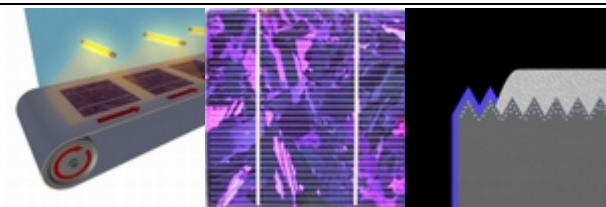
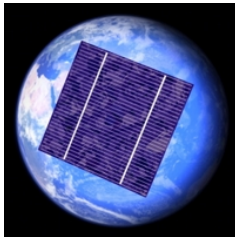
1.2.1 晶体硅太阳电池制造工艺

目前世界上大部分提供 Turnkey 解决方案的供应商都集中在单晶硅和多晶硅电池的制造领域，相对薄膜电池来说，单晶硅和多晶硅电池制造工艺已经比较稳

定成熟。非晶硅薄膜电池制造工艺虽然也已经比较成熟，但是由于衰减等原因，市场远不如晶体硅电池。表 1.1 给出了目前常规晶体硅电池的制造工艺。

表 1.1 常规晶体硅电池的制造工艺流程

工艺流程	说明	示意图
硅片切割	将硅锭切割成硅片，目前工业界大规模生产以 270 μm 的硅片居多。	
表面锯痕 腐蚀	切割之后的硅片表面已经造成损伤，采用强碱溶液腐蚀表面使之光滑，一般腐蚀深度几十个 μm 。	
织构	单晶硅采用强碱溶液，多晶硅采用强酸溶液对表面进行织构化，目的是降低表面反射率。	
喷磷	将磷酸均匀喷涂在硅片表面，粒度达到微米级，一般可以采用超声雾化设备实现。然后烘干表面。	
扩散	经过不同的温区，高温下将磷元素扩散到 P 型硅片里，在表面形成 PN 结。	
边缘腐蚀	采用等离子体轰击硅片边缘去除导电层，或采用激光刻蚀硅片边缘，将边缘与内部隔开。	

制作减反层	采用 PECVD 或 PVD 设备在硅片表面沉积一层 SiN_x , 降低表面反射率。	
印刷电极	采用丝网印刷机印刷背面电极、背面 BSF 铝浆, 表面电极 (栅线)。前两次印刷之后均要进行烘干。	
烧结电极	印刷完前电极之后将硅片送入烧结炉, 高温下把浆料烧入电池内部, 以穿透 ARC 层为止。	
分选	对烧结后的电池进行质量分类, 全部工序结束。	

电池制造生产工艺中, 化学腐蚀、扩散、减反膜制作、印刷等步骤是质量控制点。化学处理过程需要进行精确的温度和浓度控制, 补液程序也必须精确设定。否则硅片表面腐蚀质量难以保证, 并且有可能造成有毒气体或液体泄露, 带来安全隐患。扩散是制作太阳电池最核心的步骤, 为了达到较好的质量, 必须对扩散之后的质量进行检测, 一般可以采用四电阻仪等。减反膜之后可以大大降低折射率, 可以通过分光光度计等进行测量膜的质量。印刷步骤需要控制半成品的印刷栅线尺寸, 粘附力等。

1.2.2 晶体硅电池封装工艺

目前晶体硅电池产量占全球份额中的 90% 以上, 所以晶体硅电池的封装也是太阳电池封装中最主要的组成部分, 目前国内封装厂大部分采用人工封装, 各厂家封装工艺大致相同, 见表 1.2 所示。封装所需关键设备有激光切片机、层压机、测试仪等, 目前都已经可以实现国产化。

表 1.2 常规晶体硅电池封装工艺

	工序	说明
备料	电池片	切割电池片（根据要求决定是否需要）
	TPE	按照设定尺寸切割 TPE
	EVA	按照设定尺寸切割 EVA
	玻璃清洗	清洗玻璃
	玻璃外观检查	玻璃
	涂锡铜带	切割涂锡带，焊接主栅线
	接线盒	切割导线，安装正负极接头，组装接线盒
焊接	检片	确保不符合相关标准的电池片不进入下道工序
	焊接串带	按照要求焊接串联电池片
	检测	检测电池串是否有断片、短路现象
	排版	按照图纸排列电池串，焊接主栅线
	外观检测	检查待压板是否混入杂物
	检测	检查是否有破片，测量一定光强下的 V_{oc} ，无任何可能造成短路的现象
层压	层压	层压电池板
	切边	切除层压时被挤出边缘的 EVA 和剩余背板材料
	缺陷检查，分类	根据公司制定的检查标准检查电池片是否有破损，缺口，断片，颜色不一等
	胶凝度/剥离度测试	周期性检查层压板的胶凝度和剥离强度
包装	安装边框	装框
	绝缘测试	测试电池板高压下的绝缘性能(如 2670V, 1s, 50uA)
	安装接线盒	安装接线盒
	清洗	采用有机溶剂清洗表面污垢
	电性能测试	测试电池板 I-V 曲线
	分类	根据电性能，外观类别分类，标识。
	打包	打包，外箱标识

	入库	入库
--	----	----

1.3 太阳电池和组件生产设备

太阳电池市场的迅速膨胀带动上下游相关行业的兴起。硅材料、系统安装、封装材料、电池设备制造商、封装设备制造商等发展迅速。目前，全球能够提供整条太阳电池生产线和技术的厂家主要集中在欧美和日本，例如德国的 Schmid、美国的 GT Solar、德国的 Roth&Rau 等。国内还没有能提供全套设备和技术的厂家，单体设备以中电集团长沙 48 所和北京七星华创为代表。

太阳电池生产设备按照工序主要包括湿化学设备、喷淋设备、扩散炉、PECVD/PVD、丝网印刷机、烧结炉、激光切割/等离子体去边设备、单体电池测试仪、分选设备等。其中，湿化学、PECVD/PVD、丝网印刷机三项占据设备较大比例。2005 年末，台湾茂迪的 PECVD 供气系统发生事故，反向刺激了 PVD 设备的市场增长，这方面以 Applied Film 的 ATON1600 系列产品为代表。

组件生产设备和技术经过多年的积累已经比较成熟，国内封装设备已经比较成熟。关键设备如激光划片机、层压机等国内产品均已成熟，测试仪在精度和重复性方面与国外同类设备还有较大差距。附录 1 列出了部分制造商。

1.4 本文研究的重点

本论文重点集中在：

- 1：太阳电池标定方法介绍。
- 2：太阳电池组件的测试原理介绍，高效太阳电池组件的测试；
- 3：户外光伏系统的测试原理、设备开发及应用；
- 4：户外光伏系统评价。

参考文献：

[1] <http://streference.jrc.cec.eu.int/pdf/PV%20Report%202005.pdf>

[2] 沈辉，曾祖勤等，太阳能光伏发电技术，化学工业出版社，2005 年第一版，21-59.

第二章 太阳电池和组件测试

2.1 标准参考光谱

2.1.1 标准参考光谱介绍

为了对不同类型的电池作比较，国际上对测试的条件进行了标准化。其中之一就是光谱，我们称之为标准光谱（有时也称为参考光谱）。现在世界上有许多种标准光谱而最常用的有三个，分别为：AM 1.5G（ASTM—E892）用于地面总辐射；AM 1.5 D（ASTM—E891）用于地面垂直辐射；AM0 用于太空辐射。AM 指大气质量，是阳光穿过大气层的相对值，式 2.1 给出了 AM 的计算方法。

$$AM = \frac{d}{D} = \sec Z \quad (2.1)$$

其中，D 为大气层厚度，d 为太阳光通过大气层的距离，Z 为太阳光入射的天顶角。当太阳垂直入射时，AM=1，称大气质量为 1，相应的太阳光谱称为 AM1 光谱；当 Z=48.2° 时，AM=1.5，称为 AM1.5 光谱（图 2.1），附录 2 给出了 AM1.5 的光谱辐照度分布数据；Z=60° 时，为 AM2 光谱。另外，定义日地平均距离处的光谱为 AM0 光谱。根据电池使用地域的不同，空间电池一般以 AM0 光谱为标准测试，地面电池用 AM1、AM1.5、AM2 光谱。值得注意的是，这些标准光谱是实际情况的平均值。实际中绝大部分用于平板型组件的电池的测量采用 AM1.5G 光谱，而聚光电池则采用 AM 1.5D，因为聚光电池只能捕捉到垂直入射的光束。

太阳辐射到达地面之前，必须经过大气层。大气中含有固定成分的氮、氧、氢、氩等气体，还有成分不固定的水汽、臭氧、二氧化碳等气体和悬浮的烟、尘埃、花粉等固体颗粒。太阳辐射穿过大气层时，会被这些分子及微粒吸收、散射和反射，从而减弱太阳辐照度。这种减弱效应还和太阳辐照穿透大气层的距离有关，也决定于太阳辐照的方向。在实际情况中，没有任何的光源可以与参考光谱完全吻合，这就引入了一个光谱不匹配的问题。

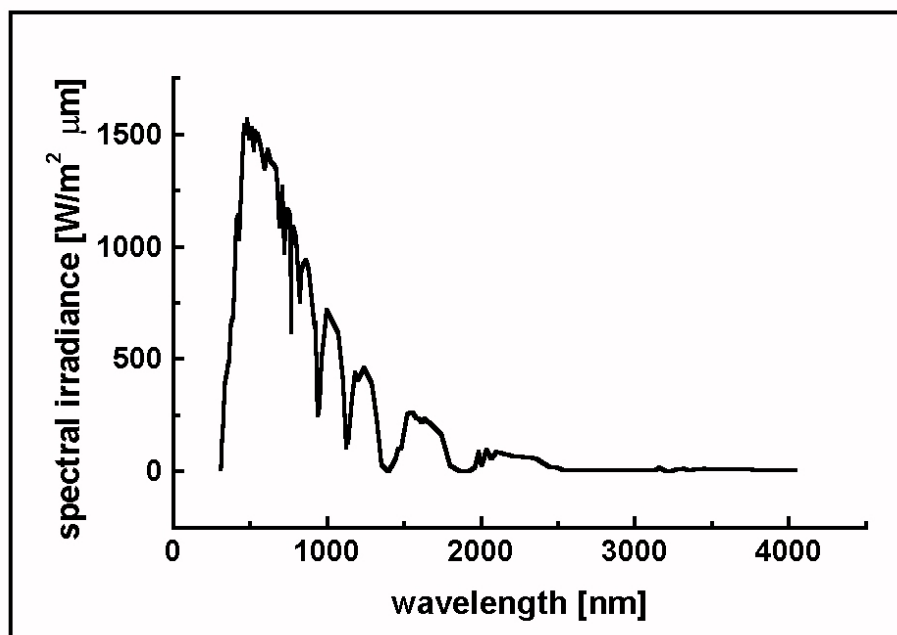


图 2.1 AM1.5 参考光谱

2.1.2 光谱不匹配

理想情况下，光源光谱是和相对光谱完全对应的（也就是说，辐照度和光谱完全与标准光谱对应）。但在现实世界中并不存在这样的光源。实际上用来测试太阳能电池的光源与标准光谱大致一样，但是使用参考探头来测量辐照度，标准光谱与实际光源光谱就会产生一个误差，称为光谱不匹配度。通常情况下考虑光谱不匹配度仅仅是因为 I_{sc} ，实际上 I_{sc} 、 V_{oc} 和 FF 都可以有相应的光谱不匹配度，但由于 V_{oc} 和 FF 对辐照度和光谱的变化敏感性远远低于 I_{sc} ，所以通常情况下只考虑 I_{sc} 。光谱不匹配 M (式 2.2) 定义为非理想光谱情况下测量 I_{sc} 与标准光谱下 I_{sc} “真值”的比值。如果实际光源的辐照度发生变化，辐照度可以被调整到与参考探头一致的输出值。和参考探头在标准光谱下的输出值一样，如果辐照度不变化，电池电流 I_{test} ($I_{test} \equiv I_{sc}$ < 电池的测量值 >) 可以线性地测量出来，——但这个辐照度修正假设 I_{test} 与辐照度成线性关系，所以，理想情况下，每块电池的 I_{test} 线性系数都必须测量。

$$M = I_{test}(\text{在光源光谱, 采用非标准辐照度进行修正过的}) / I_{test}(\text{在标准光谱下的值})$$

$$= I_{test} \times (O_{det, std} / O_{det, sor}) / I_{test, std} \quad (2.2)$$

该式里， $O_{det, std}$ 是参考探头在标准光谱下的输出值（一般来说采用辐照计则输出值为电压，如果采用标定 PV 器件则采用电流）。 $O_{det, sor}$ 是参考探头在

实际光源光谱下的输出值。 M 的值通常接近于 1，采用光谱不匹配误差 ε_m （式 2.3），可以表达出由于光谱不匹配而在电池测量中造成的误差。

$$\varepsilon_m = |1 - M| \quad (2.3)$$

M 也可以用光谱辐照度和器件光谱响应来表达（式 2.4）。

$$M = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E_{sor}(\lambda) \cdot S_{test}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E_{std}(\lambda) \cdot S_{test}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E_{std}(\lambda) \cdot S_{det}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} E_{sor}(\lambda) \cdot S_{det}(\lambda) d\lambda} \quad (2.4)$$

其中 $E_{sor}(\lambda)$ 是光源光谱的辐照度。 $S_{test}(\lambda)$ 是被测电池的光谱响应。 $E_{std}(\lambda)$ 是标准光谱的辐照度， $S_{det}(\lambda)$ 是参考探头的光谱响应，积分上下限（ λ_0 和 λ_1 ）应涵盖整个标准光谱（一般来说是 300—4000 nm 的波长）。其中只有光谱响应相对测量和辐照度的相对测量是必要的。即公式中的 E 和 S 。所以这些量中的常量会消去。

式 2-4 在考虑到一些特殊情况时就非常有用。如果两个器件有相同的光谱响应，所有被积函数相消，即 $M=1$ 。换句话说，对于相同器件，上式与光谱无关。另外，如果两个光谱完全一样，积分项同样相消 $M=1$ ，换句话说，如果光源光谱与标准光谱完全匹配，那么积分值与器件的响应无关。

上文讨论的二重性是针对较宽的波段情况而言，如果仅是大体上的近似，对于单色光上述公式同样适合。例如：假设光源光谱与标准光谱在某段波长 λ 上差异很大，如果在 λ 波长两器件有相同的光谱响应，那么式（2.3）中左上角和右下角的值就相同。如果，左上角和右下角的值相似，那么 M 就无变化。相反的，如果在 λ 波长，一种器件光谱响应优于另外一个，那么（左上，右下）中其中一项就增加很多，这会使 M 大幅度变化。换句话说，光谱误差中最坏影响处就是两种器件响应最不一致的部分。总体上说，电池与探测器越相似，所能承受的光谱误差也就越大，反之光源光谱与标准光谱越接近，越大范围内的电池测量就越精确。假如有一批相似的电池，它们其中有一部分需要在较好光谱下测试，并且只是偶尔需要测，这些已标定电池（称参考电池），可以用于在较差光谱下测量该组中的其它电池，这比在较好光谱下测量要便宜并且方便得多。

这种使用参考电池的方法应用广泛，通常获得参考电池的方法是把典型电池送到测试实验室进行标定。然而，这一过程非常昂贵（一般需 1000 美元左右）并且需要一段时间。因此，很多电池一般经过很长时间后才会重新标定。这时新生产的电池可能与以前标定的电池性能差别较大，这种情况下如果继续采用已标定参考电池测试新电池的话就会造成较大的光谱不匹配误差，此外，如果参考电池存放条件不好，就可能会退化，这会增加更多的误差。

2.1.3 光谱不匹配修正

世界的最佳光源中，即使是标准实验室都不与标准光谱完全匹配，光谱不匹配误差常常达到好多个百分点。理论上可以通过调整 M 并通过它划分 I_{test} 来减小光谱不匹配误差。这种光谱不匹配修正与标准光谱完全匹配程序被许多标准实验室所采用。

然而，光谱不匹配修正程序需要测量光源光谱辐照度和参考电池，被测电池的光谱响应。这些测试都相当昂贵、困难，并且存在相当大的不确定性。

光谱辐射度是用光谱辐射计来测试的。对于连续谱情况，如日光或连续谱的太阳模拟器，相应的设备需要 10,000 到 100,000 美元之间，对于闪光模拟器情况更加复杂，因为在几微秒的时间里光谱变化非常之大，两次闪光光谱并不会重复。这就需要快速二极管阵列光谱仪，而不是的机械式扫描型光谱仪。根据 (Zaaiman Ossensbrink et al 1994)，商用机器都做不到这一点，所以只有定制。

除此以外，光谱测量还需定期测量因为灯的光谱随使用时间而改变，Emery (Emery, Myers et al, 1988) 强调，Spectrolab X25 模拟器上用的灯光谱在 100hrs 后不匹配度为 1.5%。图 2.2 给出了 Spectrolab X25 出厂时光谱情况。X25 的实际光谱将超不出红线所标示的范围。

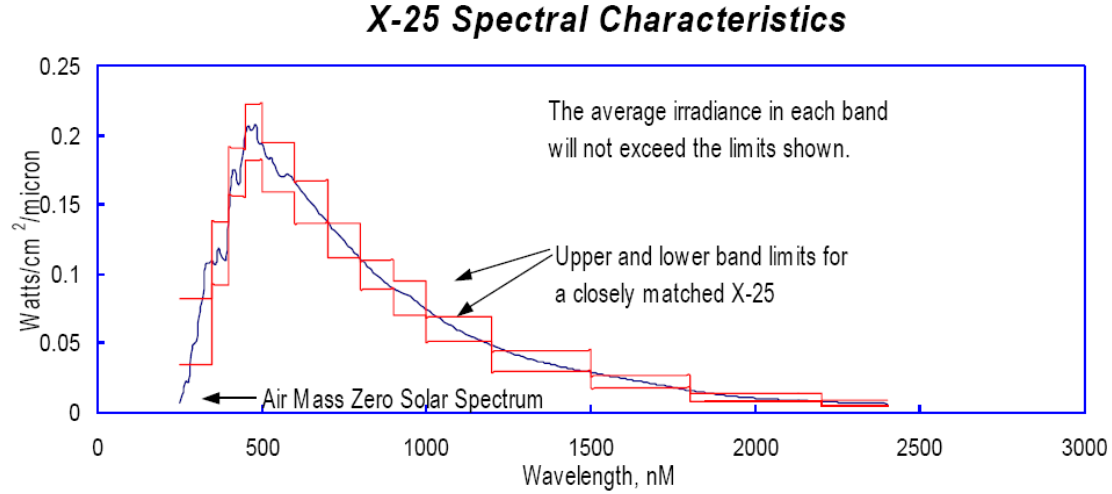


图 2.2 Spectrolab X25 模拟器光谱精确度

精确的光谱响应测量需要一个大功率电源，一个单色仪，一个接近封闭的方管。这些设备需要至少 10,000 美元。除此以外，电池的光谱响应对偏压情况特别敏感，必须小心操作以保证偏压情况正确。设备花费经常不断的重新标定，使得光谱不匹配修正非常昂贵。

2.2 太阳电池的标定

太阳电池效率的定义为：太阳电池在最佳工作状态下输出的电功率与投射到太阳电池上总的光功率之比。电功率可以用电子仪器方便测出，但光功率的测量与光谱有关，测量较为复杂。电池性能主要表现在光照下的电流特性和电压特性。前者表征电池的收集效率，后者表征电池的二极管特性。收集效率与光谱特性紧密相关，而二极管特性和填充因子则与光谱无关。所以，电池的短路电流测量最为重要。

通常采用标准电池法来测量太阳电池的性能。即选用一片太阳电池，并在某一特定的标准状态下测试其短路电流，然后以它为参考去校准测试光源的光强。确定参考电池的短路电流特性的过程称为标定，利用标定后的光源测试其它电池特性的过程称为复现。电池效率定义为：

$$\eta = \frac{1}{\Phi} V_{oc} J_{sc} FF = \frac{J_{sc}}{\Phi} (V_{oc} FF) = \bar{Q} V_{oc} FF \quad (2.5)$$

我们把 \bar{Q} 称为太阳电池的积分响应。知道电池的积分响应就可以方便地算出电池

的光电转换效率。电池的标定主要就是确定在特定光照下电池的 \overline{Q} 值。根据电池用途不同,分为空间电池标定和地面电池标定。

空间电池通常使用 AM0 光谱。标定的方法有:卫星标定、火箭标定、气球标定、飞机标定、高山标定和实验室光谱标定。一般的,卫星标定被用作实地验证其它标定方法的一种手段。火箭标定飞行高度最高,比气球高 5 倍以上,标定成本很高。高山标定简单易行。实验室标定仪器的精密程度要求较高。其中以气球标定和高山标定法较为常用。由于 99.5 % 的大气集中在 36km 以下空间,36km 处的光源状态非常接近理想的 AM0 状态。气球标定就是利用高空气球,在约 36km 处进行标定。该方法标定的电池被公认为一级标准电池。

地面用太阳电池的标定选用的大气质量在 1~2 之间。最早时采用总辐射法进行标定。即把太阳电池水平放置,直接辐射计对准太阳,总辐射计水平放置,然后同时测量太阳电池的输出和直接辐射量及总辐射量,并以此算出散射辐射量。此法受天气影响较大,结果难以互相比较。现在往往使用直接辐射法标定。其标定的量为太阳的直接辐射量和直接辐射下的电池短路电流。标定结果受天气和地域的影响较小。

太阳电池的标定可以参考国标 GB 6497-86 地面用太阳电池标定。

2.3 常规太阳电池和组件室内测试

用标定好的电池样品对测试仪器的光源进行校对,使其接近标定用的光源状态。校对后的光源称为太阳模拟器。校对采用的标准电池分为一级标准、二级标准和工作标准。一级标准经过多次标定,并和其它标定方法对比,结果能很好吻合。二级标准进行过光谱修正,精度紧跟一级标准。标准光强用的标准电池称为工作标准。一般工作标准分为很多类,比如不同剂量辐照过的电池、多晶硅电池、背场硅电池及化合物电池等。这些工作标准都按不同的复现因子进行了修正。使用时,按被测电池的不同种类进行光强校对。

太阳电池和组件的测试通常采用太阳模拟器进行测试,。太阳模拟器就是通常所说的太阳电池和组件测试仪。按照工作原理大致分为 2 类:恒光源测试仪和闪光测试仪。采用闪光测试仪用于太阳电池和组件测试已有 30 年历史之久。其优于恒光源测试仪之处在于可以在大面积内提供均匀的非常高的光强,对电池造成

的升温非常低，这对于测试没有散热装置的聚光电池时尤为重要。以前人们为 1-sun 电池和聚光电池的测试设计了各种各样的闪光测试仪。有一些在文献¹⁻⁶中可以查到，不少 1-sun 太阳电池闪光测试仪可以在市场上买到。但是至今为止专为聚光电池专门设计过测试仪非常少。

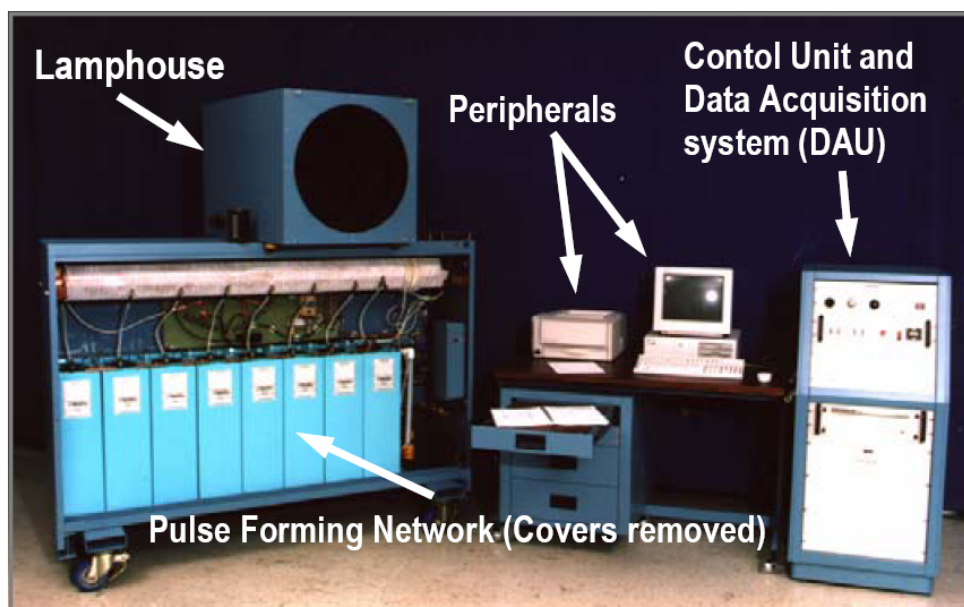


图 2.3 LAPSS II 大面积脉冲闪光测试仪

闪光测试仪整体上可分为单次闪光和多次闪光测试仪。大部分商业化的测试仪是单次闪光测试仪（如图 2.3）。这种测试仪产生平顶式光脉冲，平顶部分持续几个毫秒，这几个毫秒之内 I-V 曲线被扫描出来。实现这样的功能代价昂贵，因为使用的闪光灯必须具有数十千瓦的峰值输出功率。设计相应的电路也非常困难。单次闪光测试仪也需要为电池设计一个高速电子负载，用于几个毫秒之内扫描出 I-V 曲线。最后，高速扫描 I-V 曲线可以导致瞬时误差，对于高效电池尤甚。多次闪光测试仪，顾名思义，使用多次闪光来得到 I-V 曲线。每一次闪光只得到一对 I, V 数据。相对于单次闪光测试仪来说结构简单，造价便宜。因为既不需要复杂的电路，也不需要高速电子负载。而且在消除瞬时误差方面更有潜力。此外，所有的闪光测试仪都较昂贵。表 3 是 Photon International 杂志 2005 年 8 月份的市场调查(部分)。

表3 Photon International 2005年8月测试仪市场调查(部分)

公司	Optosolar	Spire	Atersa	Belval S. A.	Berger Lichttechnik
品型号	Sol 33×33	SPI-SUN 660	ModFlash2004	Pasan SS IIIb	PSS 32
光源	氙灯	氙灯	氙灯	氙灯	氙灯
闪光类型	单次闪光	多次闪光	单次闪光	单次闪光	单次闪光
光谱	AM1.5	AM1.5	AM1.5;	AM1.5	AM1.5
光强 (sun)	0.2-1.1	0.7-1.1	0.8-1.36	0.5-1.2	0.5-1.1
脉冲宽度(ms)	20	2	3	10	100
等级	A	B	B	A	A
精度	0.5%(0.1%)	<0.5 %	±0.2 %	±0.5 %	<0.5 %
测试点数	>200	50-256	200	4095	255
数据采集速度 (μs)		10	10	8	30
数据采集时间 (ms)		0.5-2.6	2	32.8	7.7

2.2 高效太阳电池和组件室内测试

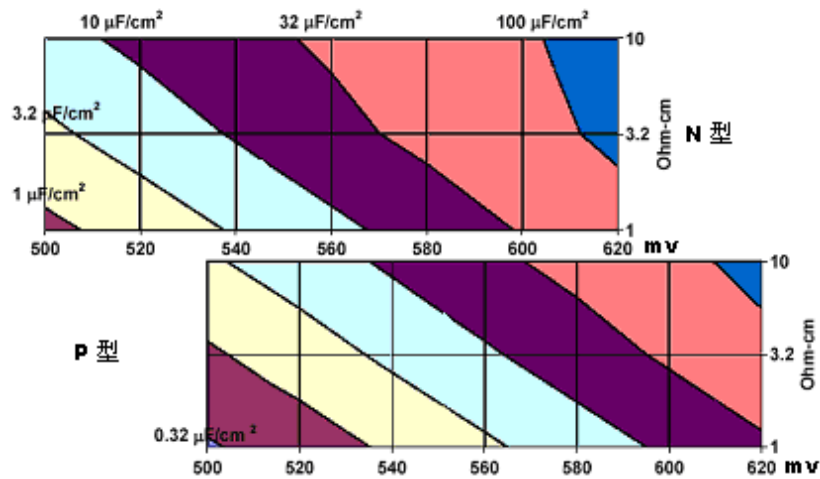
2.2.1 电容效应对测试的影响

近年来,市场上出现了几种高效太阳电池,如 SunPower 的 A-300 电池,三洋的 HIT 电池,以及 BP 的 Saturn 电池等。与常规电池相比,这些电池的 V_{oc} 较大,电容也非常大。电容的存在会影响到太阳电池在测试时对光强变化和外电路电压变化的响应时间加长,给测试结果带来不良影响。

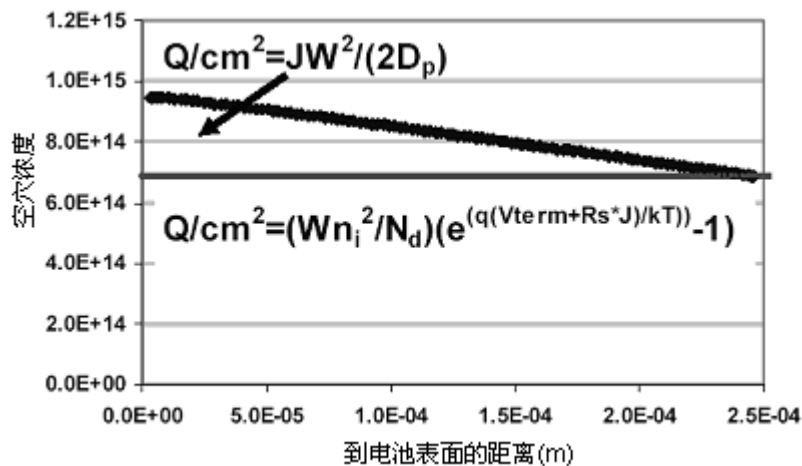
为了研究该类电池的电容与常规电池的差别,用 PC1D 软件^[1]进行了模拟。对于给定的电池,输入设计参数,可以计算出少子浓度与电压之间的对应结果,再由少子对电池宽度进行积分,得到电池电容,这样就可以获得电容- V_{oc} 对应图。通过改变基体电阻率进行多次模拟,就可以得出电池电容对 V_{oc} 和掺杂浓度的变化

图。图 1 (a) 给出了 300 μm 厚的太阳电池在开路情况下的模拟结果。

以 300 μm 左右厚的SunPower A-300 电池为例,采用n型硅片,开路电压 V_{oc} 为 670mV,最大功率点电压 V_{mp} 为 560mV,电阻率 2-10 Ωcm 。由图 2.4 (a) 可以查出电池的电容 $>100\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。而对于大部分 300 μm 左右厚的常规电池,采用p型硅片, V_{mp} 大致为 500mV,其电容为 $1\text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$,不及SunPower A-300 电池的百分之一。采用PC1D 软件模拟n+-n-p+电池,然后改变前表面和背面载流子复合速率直到 V_{oc} , J_{sc} 和FF 都符合SunPower公司公布的数据^[2],可以模拟该电池,图 2.4 (b) 给出了该电池电容组成模拟结果。可以看出,电池内部电荷(空穴)主要由两部分构成:电池背部p+n结电压所导致的载流子,即图中平行横线部分,不同结电压带来的载流子浓度不同;电压变化时载流子浓度梯度所带来的“瞬时”电流,即图中斜线部分。



(a)



(b)

图 2.4 300 μm 厚太阳电池电容模拟结果(a)和 SunPower 电池电容构成模拟结果(b)

太阳电池电容存在会对电池及组件的测试产生较大的影响。目前,以SunPower A-300 电池为代表的新型太阳电池对测试仪性能提出了较高的要求。这些电池的电容比常规电池大 $1\sim 2$ 个数量级。由于测试时要求有快速变化的光强和外电压,如果电池电容较大,则会使电池内部会储存大量的多余电荷^[2-3]。尤其对于高偏压,低掺杂,低表面复合率的情况,该电荷量更大。而SunPower电池结压较普通电池高出 0.1V 左右,少子寿命 $>1\text{ms}$ 。这些特点决定了在单闪测量条件下,电池内部产生大量的多余电荷(空穴)。电容效应的影响,导致出现下述 I-V 曲线凹陷和 I-V 曲线分离现象。

(1) I-V 曲线凹陷

采用国产普通的单闪测试仪对 SunPower 已标定组件进行 I-V 特性测试,该测试仪能提供宽度约 3ms 左右的“平顶”式光脉冲,对该标定组件的测试结果如图 2.5 所示。通过与标定值比对,FF 值高出 1.7%,电流值高出 0.1A, I-V 曲线出现了明显的“凹陷”现象。原因分析如下:采用国产单闪测试仪对该标定组件进行测试时,光脉冲在 3ms 左右时间内从 $0\text{W}/\text{m}^2$ 快速上升到 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 左右再下降到 $0\text{W}/\text{m}^2$ 。这个过程中,被测试电池组件内部的光生电流也随着外部光强发生相似的变化,测试仪的高速电子负载同步采集整个过程中的电流电压值。图 2.6 给出了太阳电池的等效电路图, R_L 是外电阻, I 是光生电流, I_L 是该电池的最大短路电流, I_s 是旁路二极管导通时的电流。由于每一块电池板内部的电池电性能都不可能完全相同,存在相对最优和相对最差的一个,所以当电池板光生电流 I 达到性能最差的一块电池的短路电流 I_L 时,整块组件的串联电流会一直降低到这个值,此时多余的电荷将储存在电池内电容里。之后,该电池等效电路中的旁路二极管导通,电池板串联电流就不再受到 I_L 限制,重新上升到实际的电流值,相当于多余的电荷放了出来。因此整个过程中电流出现先降后升的现象。

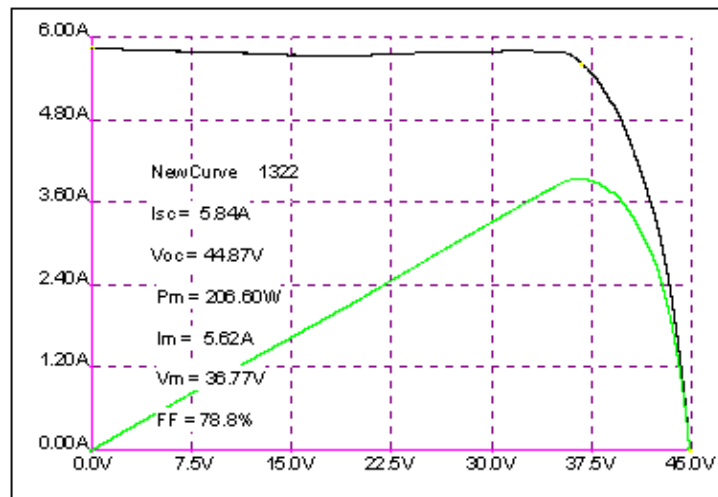


图 2.5 普通 3ms “平顶式”脉冲单闪测试仪测试 SunPower 电池组件实验结果

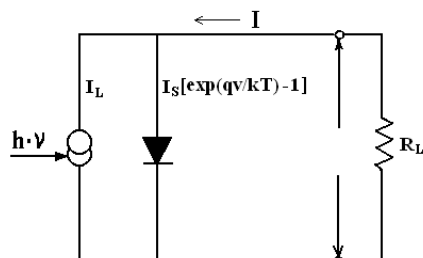


图 2.6 太阳电池等效电路图

(2) I-V 曲线分离

电池内部的多余电荷可以引起较大的瞬时误差。在光照下，有 2 种电流源会引起电池内电荷重新分布，一种是由光源引起的光生电流，另外一种是由外部电路引起的电流。在采用单闪测试仪测试时，如果电池偏压由 0 快速上升到 V_{oc} ，载流子浓度就会快速增加，多余的电子移向 p 区，多余的空穴流向 n 区，这样就会消耗掉一部分光生电流，进而引起外部测量电流的减小，FF 和 V_{oc} 测量值偏低，相当于给电容充电；如果偏压快速下降（从 V_{oc} 降低到 0），载流子浓度就会减小，这时电荷的重新分布会增加光生电流，相当于电容放电， V_{oc} 和 FF 测量值偏大。这两种效应结合起来就是“曲线分离”现象。在脉冲较窄而电池响应时间却较长的情况下，该现象尤为严重。图 2.7 给出了对 SunPower A-300 电池的模拟结果。可以看出，当电压由 0 向 V_{oc} 以 20V/s 的速率上升时，电流较稳态值略低，当电压由 V_{oc} 向 I_{sc} 以 -20V/s 的速率扫描时，电流较稳态值略高。相对于稳态情况下，曲线在最大功率点附近相对于稳态测试值有不同方向的偏离。

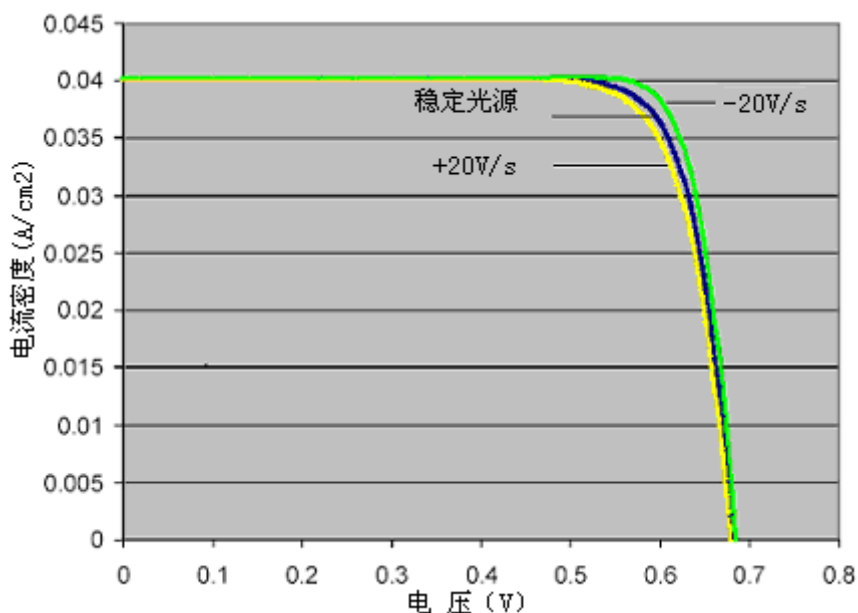


图 2.7 I-V 曲线分离现象

2.2.3 解决方法

King^[3]在研究了测试时瞬时误差与偏压变化的关系后得出结论：对于低电阻率电池 ($1 \Omega \text{ cm}$)，在偏压变化率超过 100 V/s 的情况下 FF 的误差变得较为明显 ($>1\%$)，对于高电阻率电池 ($200 \Omega \text{ cm}$)，则为 20 V/s 。据此，假设扫描完整个 I-V 曲线需要电压发生 1 V 的变化，那么对于低电阻率电池就需要至少 50 ms 的时间才能避免产生瞬时误差。以表 1 中列出的单闪测试仪来看，大部分单闪测试仪都不具备如此宽的脉冲，只有 Berger Lichttechnik 公司的 PSS 32 型测试仪可以满足该测试要求。

采用恒电压多次闪光的方法也可以很好地解决这些问题^[4]。除了 V_{oc} 是在开路下测得，不同闪光时保持电池偏压在不同的值，每次闪光取 I-V 曲线上的一个点，多次闪光之后由软件作出 I-V 曲线。为了解决 SunPower 电池组件的测试问题，从美国引进了一台恒电压频闪测试仪。该测试仪采用图 2.8 中所示的指数衰减型光脉冲，从下降阶段起，该脉冲衰减可以近似用 $\exp(-t/\tau)$ 来表达。经过实际测试证明，测试结果接近标定值。这说明该光源衰减模式较好地避免了图 1 (b) 中瞬时电荷的影响。图 2.8 是采用 PC1D 模拟保持电池偏压恒定在 V_{mp} 附近时采用该脉冲测试 SunPower A-300 电池的结果。图中的效率比值曲线是由光脉冲每一点处测得的瞬时效率与电池在“稳态光源”情况下测得的效率的比值。当比值

大于 1 时表明瞬态测试值高于稳态测试值，低于 1 时则相反。模拟结果证明了，采用该指数衰减型光脉冲的恒电压频闪测试仪也可以很好降低测量误差。

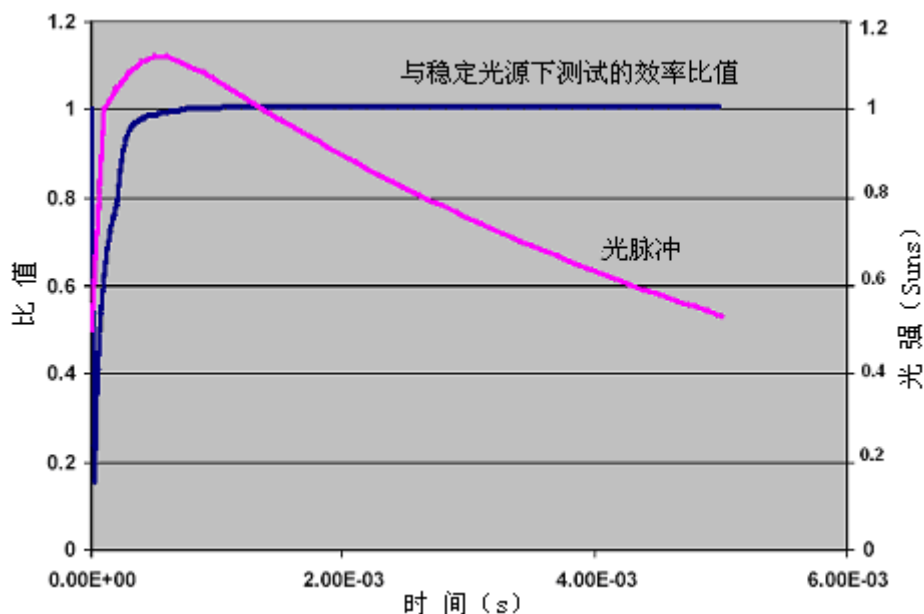


图 2.8 采用指数衰减型光源测试 SunPower 电池组件精度

市场上新近出现的大电容高效太阳电池，采用传统较窄脉冲的测试仪已不能满足测试要求。I-V 曲线的凹陷和瞬时误差导致的 I-V 曲线分离现象会给测试结果带来较大误差。采用宽脉冲单闪测试仪或频闪测试仪均可以解决问题。

不过，由于单闪测试仪需要一个峰值输出达到几十千瓦甚至更高的光脉冲并持续几个~上百个毫秒的时间，给设计、制作电路带来了一定困难。除此以外还需要为被测电池制作一个能在几个毫秒之内快速扫描出 I-V 曲线的高速电子负载。这两个特点使国内外单闪测试仪价格居高不下。对于脉冲达到几十~上百毫秒的测试仪，市场上还为数不多。

相比而言，恒电压频闪测试仪没有这些特殊要求，结构可以设计得较为简单，而且能有效减小测试时的瞬时误差，因此价格上有非常大的竞争潜力。以本文所用测试仪为例，价格不及 Optosolar Sol 33×33 的六分之一。因此可以预见，随着太阳电池性能的不断提高，低成本恒电压频闪测试仪（图 2.9）会逐渐成为市场的一个亮点。



图 2.9 频闪测试仪（测电池）

最后，作为光脉冲式组件测试仪，其本身参数水平都不高，用它们测出的组件参数的不确定度还要在稳态光源下标定。

参考文献：

- [1] <http://www.pv.unsw.edu.au/links/products/pc1d.asp>
- [2] Keith R. McIntosh, Michael J. Cudzinovic, et al, The choice of silicon wafer for the production of low-cost rear-contact solar cells. www.sunpowercorp.com,
- [3] D. L. King, J. M. Gee, and B. R. Hanson. Measurement precautions for High-Resistivity Silicon Solar Cells, Proceedings 20th, IEEE Photovoltaics Conference, pp. 555-559, 1988.
- [4] William M. Keogh, Accurate Performance Measurement of Silicon Solar Cells, Ph.D. Thesis, Australian National University, 2001. http://solar.anu.edu.au/pages/pdfs/2001_July_William_Keogh.pdf.

第三章 户外光伏系统测试

3.1 户外光伏系统测试原理

太阳能室外测试可以评价电池组件的实际发电性能，也可以作为系统诊断工具，其重要性日益增加。然而目前世界上能提供该类测试设备的厂商非常少^[1, 2]，设备种类也较为有限，价格昂贵，为使用和维护等带来诸多不便。

前文已经对太阳电池组件的室内测试进行了描述。详细上，制约因素较多，氙灯光谱、温度、参考电池与被测电池的光谱匹配性，高速电子负载等都会带来误差^[3-5]。因此太阳模拟器只适合于太阳电池组件的室内测试与标定。

相比而言，室外环境比较恶劣，太阳光谱光谱受大气折射、颗粒物、水汽等因素的影响而在不停变化，加上温度的变化，暴露于自然界的光伏电站的实际输出很难达到室内模拟器测量的功率，给评价其优劣带来一定困难，因此大多采用测量系统的实际发电量和实际 I-V 曲线。前者可以看出不同组件受温度的影响，如果配以辐照计测量实际光谱，还可以研究电池组件的实际光谱响应能力；后者则可以监测到光伏组件某一时刻的实际最大输出功率，从而为并网发电的优化提供基本参考数据。

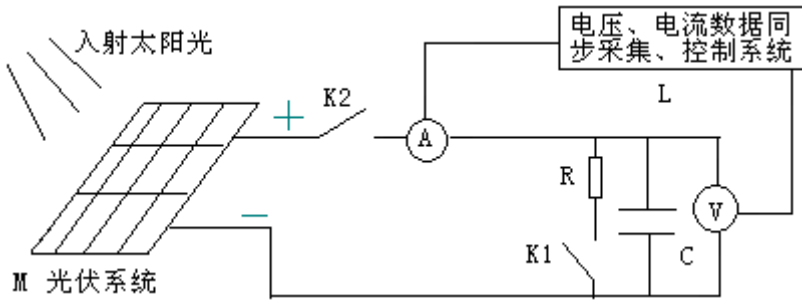


图 3.1 室外光伏阵列测试系统示意图

因此，室内测试方法在室外条件下不再适用。电容器充放电过程可以作为一个精确的可变负载，根据此原理可以将其尝试用于室外光伏阵列测试，图 3.1 给出了据此作出的光伏阵列测试原理示意图。太阳光照射到光伏阵列上后，在开路情况下产生光生电压 U ，此时如果闭合开关 K2，打开 K1，那么外电路就会导通，电容器 C 开始充电，直至电压与 U 相同。这个过程中电容器两端电压从 0

上升到 U , 电路电流从最大输出 I_{sc} 到 0, 电容器在这个电路中的作用相当于一个可变负载。如果把这个过程的数据记录下来, 那么就可以描绘出光伏阵列输出电流-电压的变化曲线。等到电容器充电完毕之后, 打开开关 K_2 , 闭合开关 K_1 , 光伏阵列重新处于开路状态, 电容器通过电阻 R 放电。

3.2 测试系统研制

3.2.1 测试系统设计

为了解决这个问题, 根据上述原理设计了一个初步能够实现此功能的测试系统控制图(图 3.2), 包含如下几个模块: 光伏阵列, 电流、电压传感器阵列, 数据采集卡、AC/DC 电源、计算机、固态继电器控制单元、电容器阵列等。

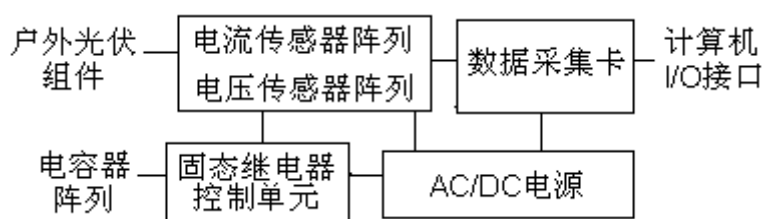


图 3.2 测试系统控制图

各部分功能分别是: 户外光伏组件是实验对象; AC/DC 电源给固态继电器、传感器和数据采集卡供电; 固态继电器同时控制传感器和电容器; 数据采集卡实现模拟量到数字量的转换并与计算机进行数据传输; 电容器阵列实现可变负载的功能。

工作时, 继电器开启电压和电流传感器, 同步采集室外光伏组件的电流电压模拟量, 通过数据采集卡转换成数字量, 由组态软件通过计算机 I/O 接口储存在计算机数据库里。通过自行开发的程序可随时读取数据并生成电流-电压曲线。采集到预定时间后, 继电器闭合传感器阵列, 之后控制电容器放电, 达到设定的时间间隔后进入下一个数据采集循环。

3.2.2 硬件和软件配备

电路设计完成之后, 下一步就是配备硬件和软件。本节内容集中叙述 3.2.1 中所需要的几个模块: 光伏阵列, 电流、电压传感器阵列, 数据采集卡、AC/DC

电源、计算机、固态继电器控制单元、电容器阵列等的配备。

(1) 光伏阵列：由太阳电池组件组成，一般情况下太阳电池组件分为单晶硅、多晶硅和薄膜三种。单晶硅和多晶硅电池组件的电性能比较稳定，目前市场上大部分组件生产厂家都能保证 20-25 年后输出功率达到购买时的 80-85%以上。目前市场化的薄膜电池组件主要有 CIGS、CdTe、非晶硅等三种，CIGS 和 CdTe 电池组件输出较为稳定，非晶硅电池组件衰减比较严重，一般出厂时 6-7%的组件，1000 小时后效率衰减 10%，一年之后效率衰减过半。为了验证设备的稳定性，结合实际情况，选择德国西门子、美国 SunPower 两家公司生产的电池组件(表 3.1)。西门子生产的电池组件是普通单晶硅电池组件，SunPower 公司的组件比较有特色，所有电池的栅线均设计在电池背面，因此从正面看不到焊接涂锡带，因为没有栅线的遮光，所以电池效率也因此得到提高，单片电池效率达到 20%以上，见图 3.2。

表 3.1 电池板功率测试结果

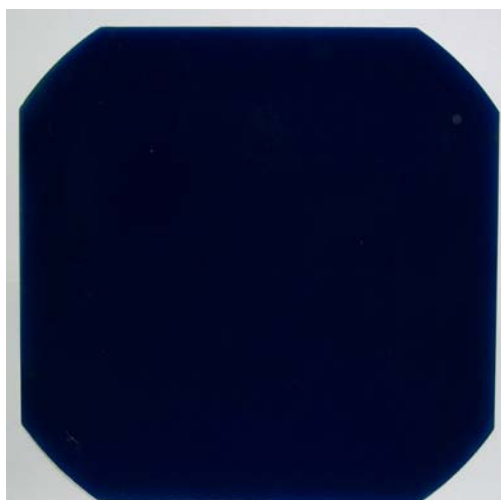
	光伏系统 1					光伏系统 2	对比
电池板	西 门 子 1#	西 门 子 2#	西 门 子 3#	西 门 子 4#	合计	SunPower	Sie/Sp
Pmax (W)	43.85	44.07	44.03	44.76	176.71	86.9	2.03
Voc (V)	21.56	21.50	21.43	21.52	21.50	20.9	1.03
Isc (A)	3.46	3.46	3.41	3.43	13.76	5.70	2.41
Vpm (V)	13.77	13.77	13.76	13.77	13.77	17.4	0.79
Ipm (A)	3.19	3.20	3.20	3.25	12.84	5.0	2.57
FF	58.8%	59.2%	59.7%	60.6%	59.6%	72.9%	0.82



(a) 光伏系统 1— Siemens 组件



(b) 光伏系统 2—SunPower 组件



(c) SunPower 电池正面



(d) SunPower 电池反面

图 3.2 被测系统及 SunPower 电池

设计时, Siemens 的四块电池板并联组成系统 1, SunPower 的单块电池板组成系统 2。那么系统 A 的最大输出电流 13.7A, 最大输出电压 21.5V 左右; 系统 B 的最大输出电流和电压分别为 5.7A 和 21V 左右。

(2) 电容器选择: 电容器的选择首先要考虑充电时间的长短。电容器的基本公式是

$$C = I \cdot t / V \quad (3.1)$$

其中 C 代表电容, I 代表充电电流, t 代表充电时间, V 代表充电后电压。光伏阵列的 I-V 特性曲线并非线形, 电流在电压上升到 V_{pm} 之前变化较小, 基本呈直线下降, V_{pm} 之后快速下降, 电压变化趋势则刚好相反。充电时间的长短无法计算, 尤其是弱光下充电电流较小, 只有根据实际情况来摸索, 最初假定 1 秒钟的充电时间。保守起见, 假设充电时电流大小为系统最大输出电流, 那么据此计算出系统 A 和 B 分别需要 0.64F 和 0.27F, 根据电容器厂家能够提供的产品型号, 选取 2 套 1F, 70V 的电容器。实际上, 根据设备完成后的测量与观察, 电容器充电时达到电池板最大输出功率处 (实际 V_{pm} , I_{pm}) 的时间较短, 但是在光强较弱的情况下则较长。另外和光伏阵列的输出电流有关, 同一光伏阵列在光强较弱情况下比在光强较强情况下充电时间长。因此, 为了能够测量全天大部分时间段较为完整的 I-V 数据, 不断地调整充电时间, 最后设定为 15 秒。此时从早上 9 点钟左右至下午 4 点钟之前都可以测量出来。

(3) 传感器的选择: 根据系统 1 与 2 的要求, 选择市售 LEM LN28NP 传感器。和

LV28P 电压传感器。传感器的基本数据如下：

LA28-NP 电流传感器：	LV28-P 电压传感器：
测量范围：5A/6A/8A/12A/25A 可选	测量范围：10V—500V
精度： $\pm 0.5\%$	精度： $\pm 0.6\%$
线性度： $< 0.2\%$	线性度： $< 0.2\%$
响应时间： < 1 微秒	响应时间： < 40 微秒

详细的传感器资料见附录 4。

(4) 数据采集卡：采用 PCI-8310 模拟量采集卡。PCI-8310 模入接口卡适用于提供了 PCI 总线插槽的 PC 系列微机，具有即插即用（PnP）的功能。其操作系统可选用目前流行的 Windows 系列、高稳定性的 Unix 等多种操作系统以及专业数据采集分析系统 LabVIEW 等软件环境。在硬件的安装上也非常简单，使用时只需将接口卡插入机内任何一个 PCI 总线插槽中并用螺丝固定，信号电缆从机箱外部直接接入。

继电器和电源选择一般市售普通产品即可。

(5) 软件：采用市售 PC Auto3.6 组态软件。该软件可以实现数据的采集与存储，并具有设定采样时间和采样频率的功能，但是不能作出 I-V 图，为此开发了一个数据读取软件，实现作图功能。所开发的软件具有查询 I-V 曲线，功率-时间曲线等功能。

图 3.3 是测试系统的照片。



(a) 测试系统整体

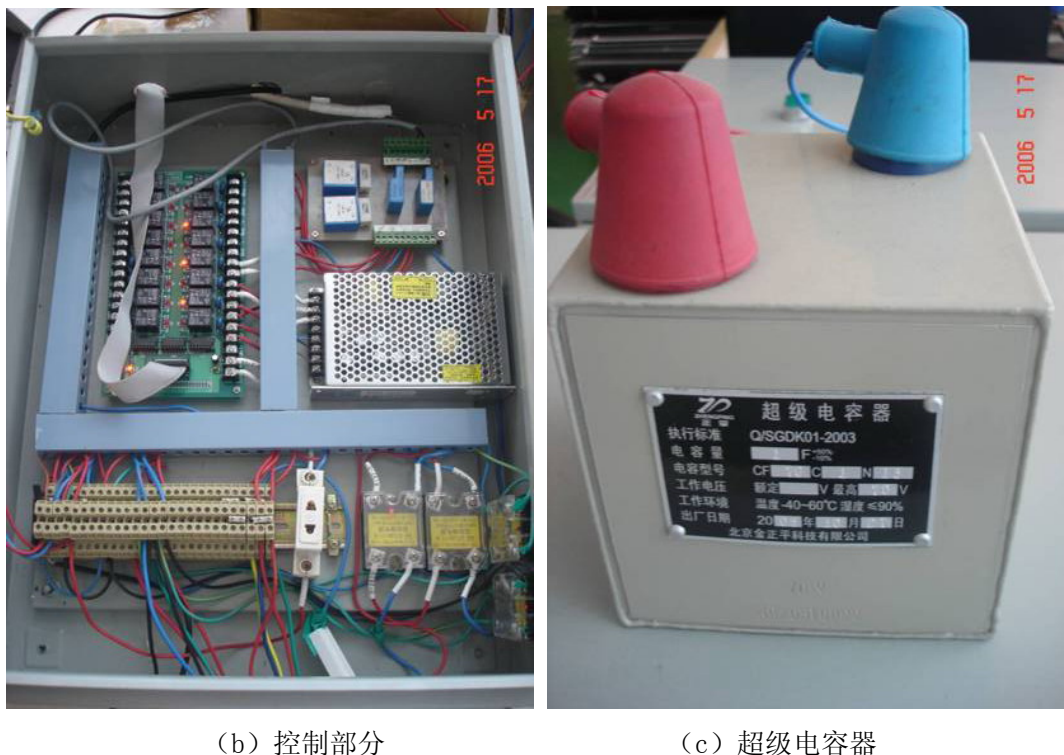


图 3.3 本文中研制的测试系统照片

3.2.3 系统操作、调试及运行

系统设计之初考虑到扩展性，预置了 2 路电流和电压传感器，其中一路可以测量 25A 以内电流，70V 以内电压。根据最初的设计，可以根据需要很随时扩展到 6-7 路。从系统运行之后，根据实际需要，对光伏系统进行了更换，将 SunPower 光伏组件更换为 200W 左右的电池板，输出电流基本保持不变，输出电压增加为 48V 左右，由于系统设计时已经较好地考虑到扩展性，所以基本上不受影响。

该系统于 2005 年 11 月份试运行。考虑到数据库存储能力，硬件寿命和天气变化的影响，采样间隔时间从最初的 10 分钟调整到 20 分钟，采样时间由预期的 1-3 秒调整至 15 秒，采样频率由 50 对/s 调整为 10 对/s。采集后的数据经 PCAuto 软件储存在 Microsoft Access 数据库里。经过数据读取和编辑软件处理后可以实现查询编辑电流-时间曲线、电压-时间曲线、功率-时间曲线和 I-V 曲线的功能。通过“日期”项下拉列表可以选择日期，“最大值按”一栏里有三个下拉选项，分别是电流、电压、功率，默认为功率；“图表”选项包含两项：电流-电压，最大值-时间。里的任意一项点击“查询”按钮。查询时，首先选定日期，以 2005 年 12 月 23 日为例，然后选择“最大值按”一栏，例如选择功率，之后

选择“图表”栏里的“电流-电压”项，点击“查询”按钮，得到图 3.4(a)所示的结果。图中的曲线即 I-V 曲线。如果想得到该曲线对应的精确短路电流和开路电压，则可以分别改变“最大值按”一栏至电流和电压，找到相同时间附近的值即可图 3.4 (b), (c)，图 3.4(d)则是采集数据时功率随时间变化的曲线。。

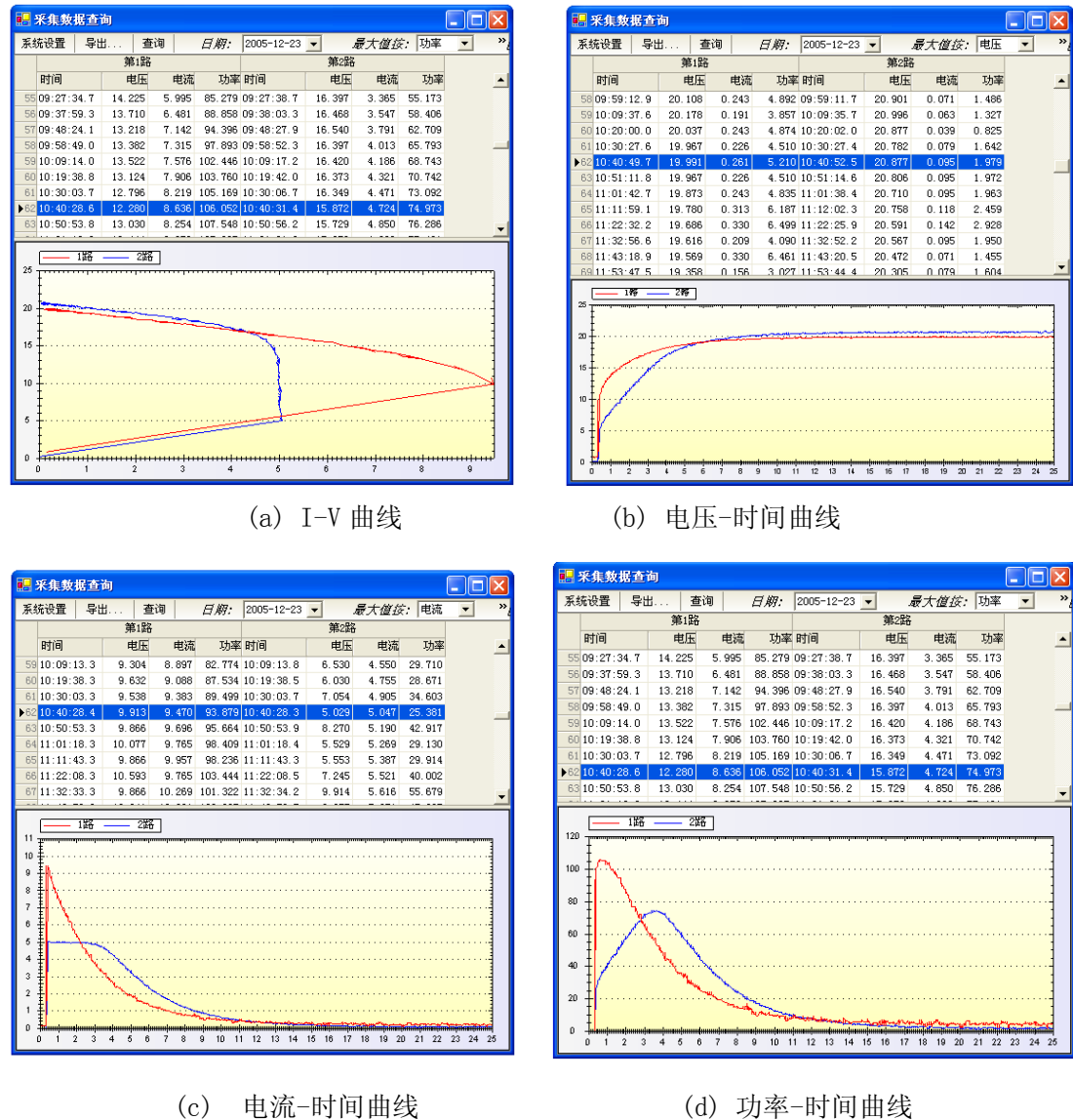


图 3.3 运行情况

整体来讲，该系统的性能可以归纳于下表 3.2。

表 3.2 系统性能

性能	说明
测试功率范围	0-1000W，可扩展
测量方式	单次/连续长期循环测量
操作模式	全自动

测量精度	$\leq \pm 0.3\%$
测量参数	Voc, Isc, Pmax, Imp, Vmp
电压范围(V)	0-70
电流范围(A)	25A
工作温度(°C)	-40-60
采样频率(数据对/秒)	0-2,000 可调
采样时间	可调
操作软件	市售 PC Auto3.60 软件
电源	220V AC 或 15VDC
I/O 接口	标准扩展槽
测量路数	2 路, 可扩展到 6-7 路
计算机配备	台式电脑

参考文献

- [1] <http://www.ib-mut.de>
- [2] <http://www.chinayibei.com/chanpin.htm>
- [3] D. L. King, J. M. Gee, and B. R. Hanson. Measurement precautions for High-Resistivity Silicon Solar Cells, Proceedings 20th, IEEE Photovoltaics Conference, pp. 555-559, 1988.
- [4] William M. Keogh, Accurate Performance Measurement of Silicon Solar Cells, Ph.D. Thesis, Australian National University, 2001. http://solar.anu.edu.au/pages/pdfs/2001_July_William_Keogh.pdf.
- [5] Constant voltage I-V curve flashtester for solar cells, William M. Keogh, Andrew W. Blakers, etc. Solar Energy Materials & Solar Cells 81 (2004) 183-196

第四章 户外测试结果分析及光伏系统性能评价

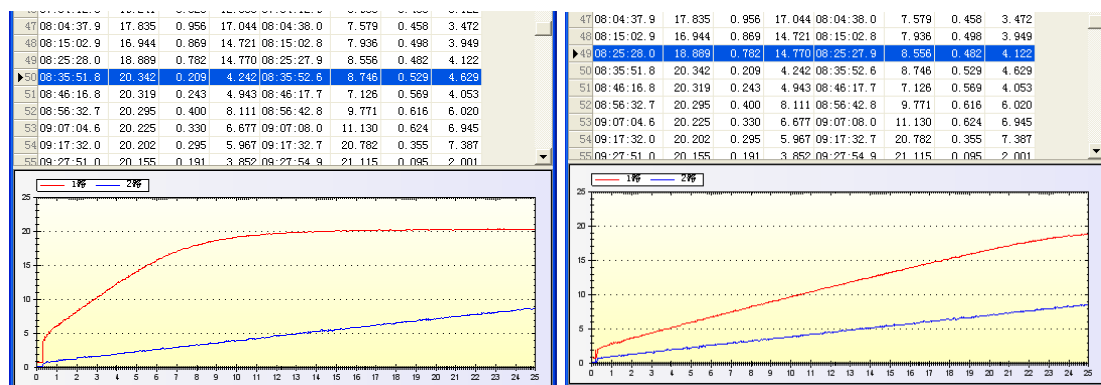
由于光伏系统根据实际情况需要更换,所以重点放在对短时间内测试结果的分析上。本节将首先对各参数采集数据的准确性进行分析,然后对比分析 Siemens 和 SunPower 光伏系统的输出性能。选取 2005 年 12 月 23 日 7:00-18:00 内的采集数据,0:00-7:00 和晚上 18:00-次日 0:00 室外光强非常弱,光伏组件几乎没有输出。对实际应用也没有多大意义,因此舍弃。该日的采集数据见附录 5。

4.1 测量准确性分析

4.1.1 Voc: 采集数据在光强较弱时误差较大

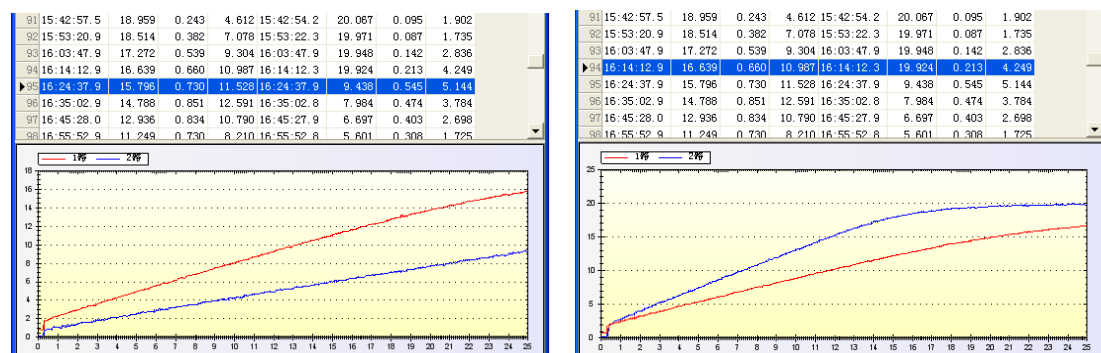
对于该测量系统,充电稳定之后,电容器两端电压不再发生变化,充电电流为 0,光伏系统实际上处于开路状态,此时电容器两端的电压即光伏系统的 Voc。图 4.1 给出了该日不同时刻充电电压曲线,仅对于 Siemens 系统来说,在早上 8:35(b)到 16:14(c)之间的充电过程可以较好完成,电容器两端电压稳定,此时开路电压测量数据较为准确;在这个时间段以外的((a)和(d)),由于光强较弱,充电电流和电压都很小,数据采集结束之前充电不能完成,曲线并未达到平稳状态,因此所测量的 Voc 值低于实际 Voc。从(a)和(b)电流曲线里也可以看出,光强较弱时在采集结束前电流高于 0A,充电并未完成。相比来说 SunPower 系统 Voc 测量准确区间在 9:30-16:14 之间。

解决这个问题的方法是增加充电时间。但是增加充电时间之后,数据存储量增大,系统数据库压力较大。通过图 4.1.1.2 可以看出,下午 16:30 之后开路电压已经逐渐开始降低至 15V 以下,如果加上负载,那么电压很可能低于 12V,没有多大实用意义。



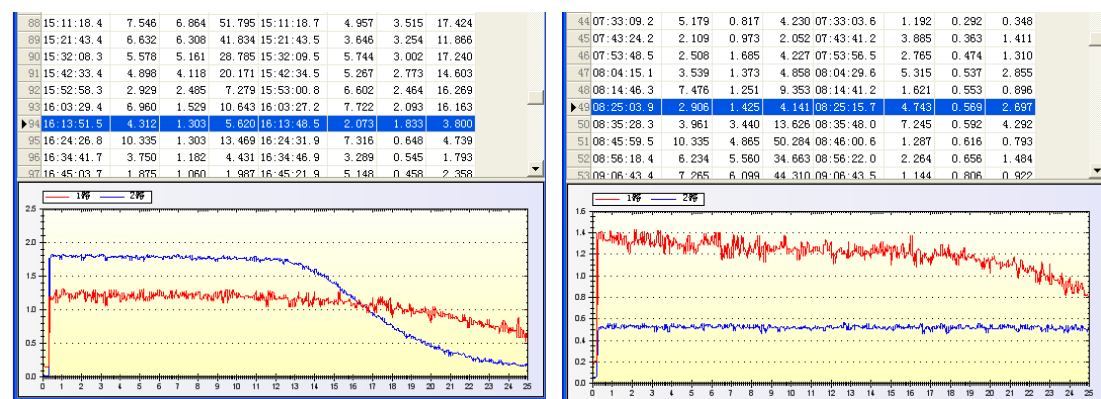
(a) 8:25 充电电压曲线

(b) 8:35 充电电压曲线



(c) 16:14 充电电压曲线

(d) 16:24 充电电压曲线



(e) 8:25 充电电流曲线

(f) 16:14 充电电流曲线

图 4.1 Voc 准确测量时间段

4.1.2 Isc: 采集数据准确

最大充电电流不受时间的影响，因为充电开始时就达到最大。所以短路电流的测量是比较精确的。短路电流与室外辐照度近似成正比。所以 Isc 的数据也反映了室外辐射情况的变化。

4.1.3 Pmax, Vmp, Imp

Pmax 的测量值与电压测量值一样，在低光强下，由于在充电结束前功率曲线并未到达最大值，表现出较大误差。如图 4.2 中所示。可以看出，由于 Vmp 比 Voc 较早采集到，所以测量准确的时间段要长一些。

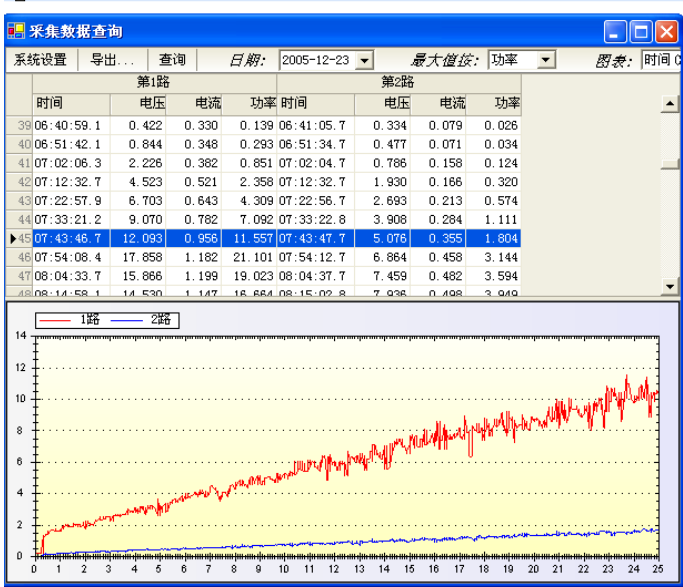


图 4.2 7:43 弱光下功率测量情况

4.2 光伏系统性能评价

4.2.1 运行情况

两个系统全天运行后所采集的 Isc 和 Voc 变化如图 4.3 所示。从中可以看出，两系统在实际自然环境中输出电性能基本上与天气变化相符合，说明系统运行正常。

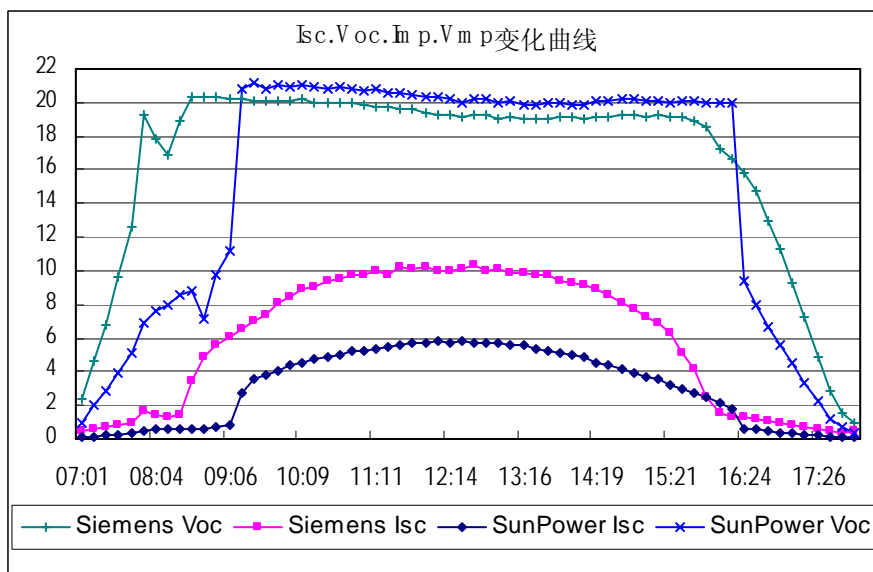


图 4.3 两系统全天运行情况

4.2.2 强光下输出性能比较

9:30-16:00 时间段内各参数测量都比较准确, 采用这一段数据对两系统的 FF 进行了统计分析 (图 4.4)。SunPower 系统 FF 平均值 70.8%, 达到室内测量值 97%, 测量数据标准差 2.2%; Siemens 系统 FF 平均值 56.3%, 占室内测量值 94.5%, 测量数据标准差 2.4%。这些数据均表明强光下 SunPower 系统的性能要明显优于 Siemens, FF 离散度方面 SunPower 略显优势, 表明该电池组件运行更稳定, 不易受外界环境因素影响。

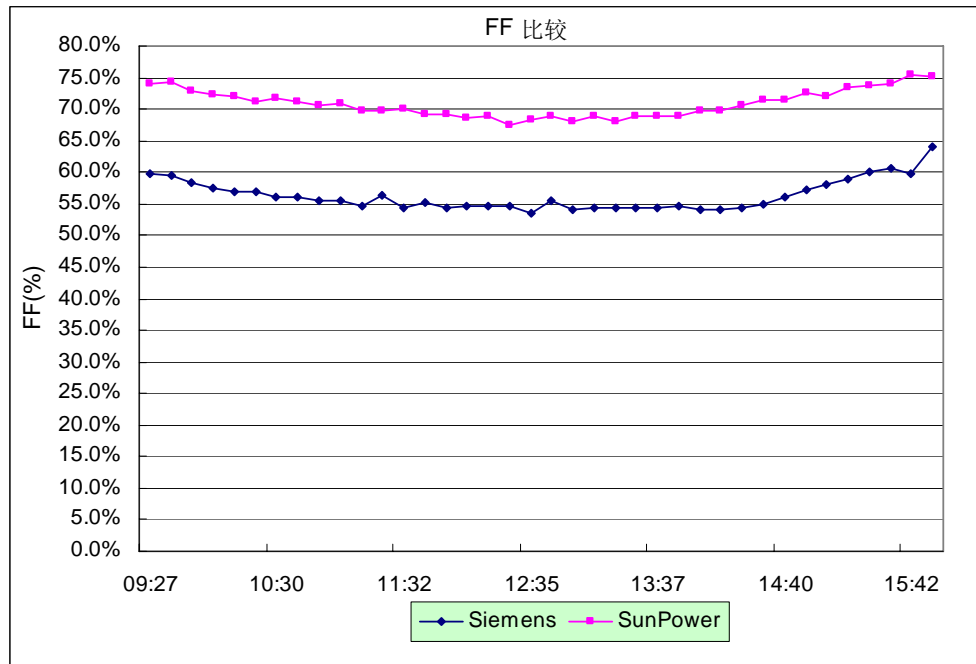
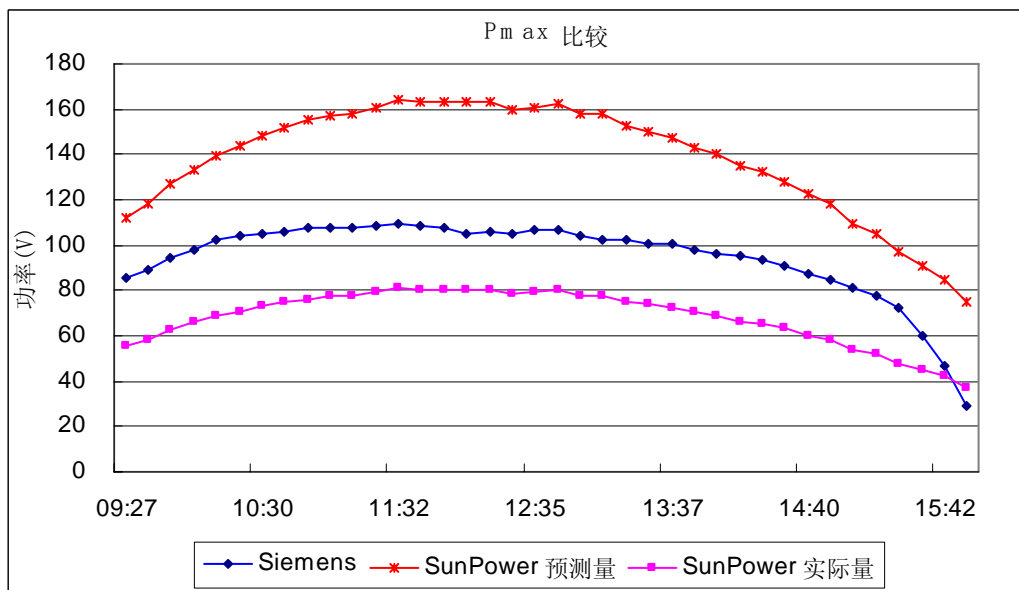


图 4.4 强光下 FF 比较

假设 SunPower 系统与 Siemens 系统室内标称功率值相等，而且每一时刻实测功率值变化与标称功率值变化成线性关系，那么可以将 SunPower 系统功率实测值放大 2.03 ($=176.7\text{W}/86.9\text{W}$) 倍，这样就可以作出 P_{\max} 的相对比较图 4.5。图中可以明显看出在强光时段下相同功率的 SunPower 组件室外最大功率明显高于 Siemens 组件，经计算平均高出 48%。

图 4.5 P_{\max} 相对比较图

通过进行强光下 FF 和 P_{\max} 的相对量比较，可以明显看出 SunPower 光伏组

件在室外光强较强时间段(9:30–15:30)内整体性能明显优于 Siemens 系统。这与 SunPower 电池独特的设计是分不开的,从图 4.6 里可以看出,为了提高效率, SunPower A-300 电池采取了许多特殊的结构设计,除了独特的背面栅线结构,还有非常少见的前表面场,并且采用 N 型半导体高纯硅,少子寿命 1000us 以上,而普通的电池一般只有~10us 左右。在当前的光伏市场中, SunPower A-300 电池是高端市场里的一枝独秀。

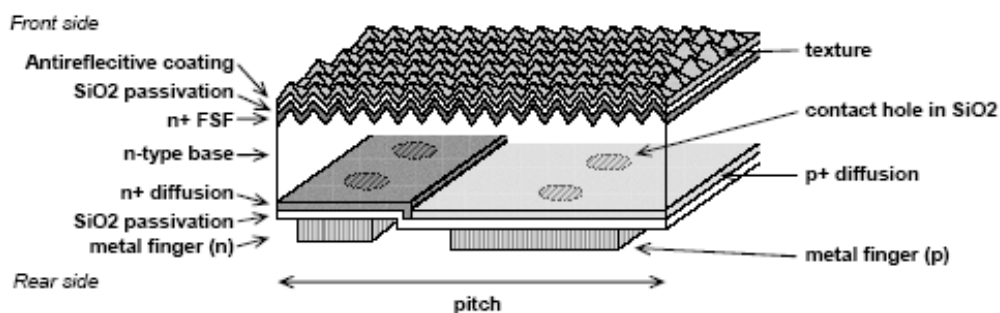


图 4.6 SunPower 电池结构图^[1]

4.2.3 弱光下输出性能比较

弱光下只有 I_{sc} 值测量比较准确,因此采用 I_{sc} 进行分析。

图 4.7 和 4.8 是 7:00–9:30 和 16:00–18:00 的 I_{sc} 比较图,其中给出了 SunPower 实测量和按照表 3.1 中的比例放大后的量。

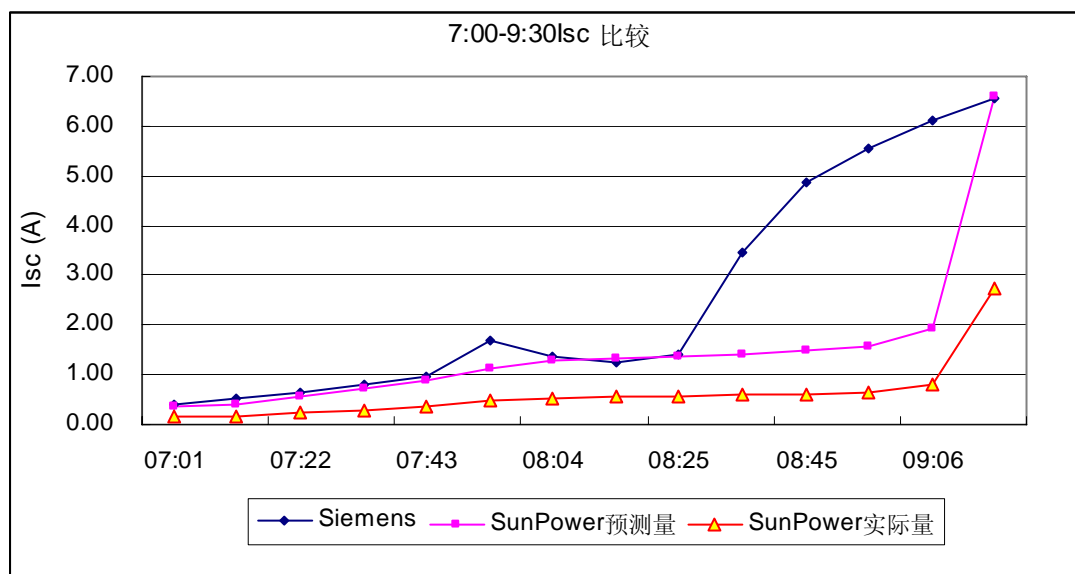


图 4.7 7:00–9:30 I_{sc} 比较

该图表明:在 8:25 之前,光强比较弱的情况下,两系统电性能输出非常接

近，但是在光强迅速增加的过程中，Siemens 光伏系统的 I_{sc} 较 SunPower 系统呈现出更加明显的上升趋势。

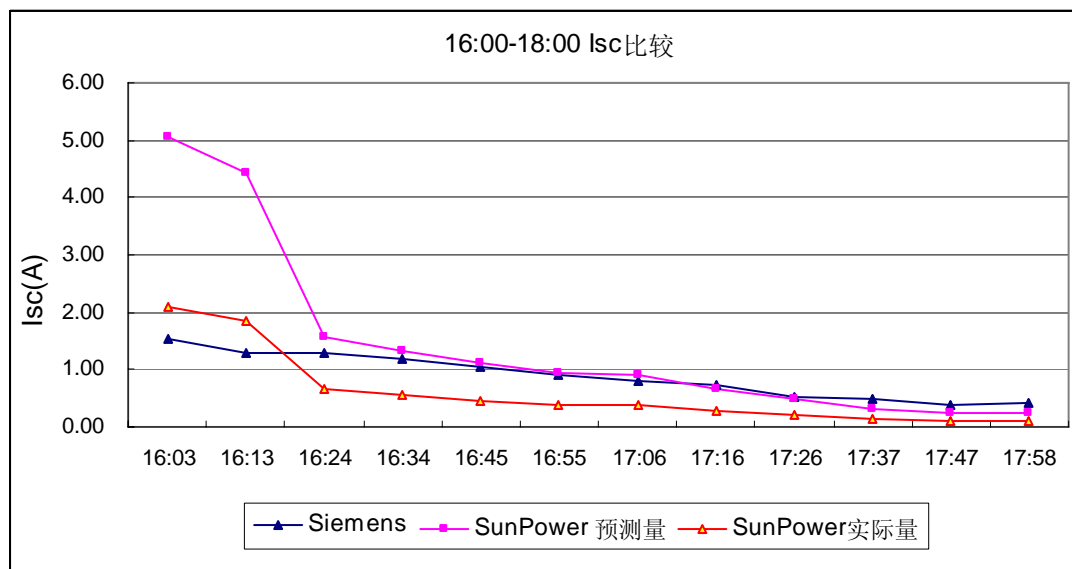


图 4.8 16:00-18:00 I_{sc} 比较

图 4.8 的情况与图 4.7 的差别在于在下午光强迅速下降的过程中 SunPower 光伏组件表现出较高的 I_{sc} ，但是下降速度也非常快。在光强下降到一定程度之后两者 I_{sc} 性能表现差别不大。

早上光强快速上升阶段和下午光强快速下降阶段 Siemens 系统和 SunPower 系统 I_{sc} 分别表现出各自的优势，这可能与两者的光谱相应有关；较弱光强下相差不大。

整体来说，两者的弱光性能表现不差上下，由于这两个时段对全天的发电量贡献不大，就独立系统来说，利用价值也不高。

参考文献

[1] www.sunpowercorp.com

第五章 结 论

为了适应国内光伏产业的迅速发展,本文将太阳电池的标定、光伏组件的测试、户外光伏系统的测试系统地进行介绍,市场上新出现的高效率太阳电池组件已经不能采用传统的短脉冲单次闪光测试仪进行测试,采用多次闪光测试仪或脉冲较宽的测试仪可以解决此问题;根据电容器的充放电可以作为电子负载这一原理设计开发出户外光伏阵列测量系统,成功地对光伏系统的关键参数进行采集;通过对 Siemens 和 SunPower 光伏系统的测试数据分析对两系统进行了性能评价,就全天辐照来讲 SunPower 系统的输出优于 Siemens 系统。不过作为一个实验室试开发的设备,还有许多需要改进的地方:采用直流电源代替交流电源,采用笔记本电脑代替台式机,实现便携式测量;数据采集时间可以自动随辐照度变化;采用不同容量的继电器和电容器阵列,满足较大光伏阵列的测量要求等。除了应用于系统的评估,该系统也可以用于长期发电量以及光伏组件半成品的测量等,相关的工作有待进一步研究。

攻读硕士阶段发表文章

1 宋文祥 沈 辉 于培诺 程世昌 丁孔贤 Ronald. A. Sinton 等, 电容效应对高效太阳能电池 I-V 特性测试的影响及解决方法, 能源工程 (国家中文核心期刊), 已接收, 2006 年第 4 期。

2 宋文祥 沈 辉 于培诺 程世昌 丁孔贤等, 采用电容充放电原理的小型室外光伏阵列测试系统, 可再生能源 (国家中文核心期刊), 已接收, 2007 年第 2.3 期。

致 谢

衷心感谢导师沈辉博士，沈老师给予我非常难得的机会，使我能够在企业里接触到世界领先的产品和技术，同时在企业管理的方方面面受益匪浅。硕士论文工作过程中沈老师给予我全方位的指导，使得论文工作在科学研究的基础上兼顾企业的需求，论文的成果直接被企业和实验室所使用。学习和生活上，沈老师对我关怀至微。沈老师正直的人格、渊博的学识、严谨的治学态度、勤奋工作的精神、开放灵活的思维方式让我终生受益。

感谢深圳珈伟太阳能光电董事长丁孔贤先生和副总经理程世昌先生对户外测试设备研发所提供的资助和长期指导。

感谢著名光伏专家于培诺先生在太阳电池光谱和标定方面的悉心指导

感谢美国测试专家 Ron. Sinton 先生在光伏测试理论和设备方面的指导。

感谢美国 SunPower 公司的顾问委员会主席 Charley F Gay 在太阳电池制造及理论方面给予的指导，SunPower 太阳电池及组件开发部门负责人 Doug. Rose 先生和测试工程师 Karen Wilson 女士在太阳电池组件制造、标定、测试分析方面给予的多次指导。

感谢中山大学太阳能系统研究所莫党教授、舒碧芬教授、黄向阳、班群、陈维、张臻、刘勇、夏建汉、胡芸菲、邓晓敏、王巧、邓涛、柳锡运、王建强、郭志球等同学在我读研期间给予的指导和帮助。

感谢中国科学院广州能源研究所梁宗存、徐雪青、舒杰等老师在我的硕士学习期间所提供的帮助。感谢广州能源研究所党政办和其他部门的老师和工作人员所给予的支持和帮助。

感谢长久以来一直支持、关心和爱护我的家人和朋友。

2006 年 5 月

附 录

附录 1 部分太阳能电池生产设备供应商

名称	国家	地址	联系方式	业务
Affiliated Manufacturers Inc (AMI)	美国	3087 US Highway 22, PO Box 5049, USA	Tel: 1 908 722 7100 Fax: 1 908 722 5082 E Mail: sales@ami-presco.com	丝网印刷机
Amtech Systems, Inc	美国	131 South Clark Drive Tempe, Arizona, USA	Tel: 1 (480) 967-5146 Fax: 1 (480) 968-3763 E Mail: sales@amtechsystems.com	扩散炉、硅片 加工
Applied Films	德国	Siemensstrasse 100 63755 Alzenau, Germany	Tel: 49 6023 92 6050 Fax: 49 6023 92 6430 E Mail: cdaube@eu.appliedfilms.com	PVD 、 PECVD 设备
Arnold Gruppe (Herbert Arnold GMBH & CO. KG)	德国	Weilstr. 6, 35781 Weilburg, Germany	Tel: 49 64 71 / 93 94 0 Fax: 49 6471 / 20 65 E Mail:	硅片和硅锭 加工设备
ASTEC GmbH	德国	Hinterhofen 21, D-79291, Merdingen, Germany	Tel: 49 9189 4404 0 Fax: 49 9189 4404 20 E Mail:	自动湿法设 备
Baccini spa	意大利	Via Postumia Ovest 244, 31050 Olmi di S.Biagio di C. (TV), Italy	Tel: 39 0422 892101 Fax: E Mail: Baccini@interbusiness.it	丝网印刷机
BOC Edwards Chemical Management Europe	英国	Avis Way, Newhaven, BN9 ODJ, United Kingdom	Tel: 44 1273 513653 Fax: 44 1273 517449 E Mail:	人工/自动化 湿化学处理 和清洗系统,

Ltd			ian.henderson@bocedwards-cme .co.uk	化工产品
Centrotherm Photovoltaics GmbH + Co KG	德国	Johannes-Schmid-Str. 3, 89143 Blaubeuren, Germany	Tel: 49 7344 9186-0 Fax: 49 7344 9186-388 E Mail:	太阳电池制 造整线方案 和分体设备
Ceradyne Inc. Thermo Materials Division	美国	PO Box 925, 3449 Church Street, Scottdale, Georgia 30079, USA	Tel: 1 404 292 4242 Fax: 1 404 292 9557 E Mail:	坩埚
Chemartin AG	瑞士	Batteriestrasse 2, CH-4103 Bottmingen, Switzerland	Tel: 41 61 422 16 71 Fax: 41 61 422 1670 E Mail:	电池焊接设 备
Crystec	德国	Crystec Technology Trading GmbH, Zinngiesserstr. 7, D-84503 Altötting, Germany	Tel: 49 8671 8821 73 Fax: 49 8671 8821 77 E Mail:	传送装置、管 式炉
Despatch Industries	美国	8860 207th Street West Minneapolis, MN 55044, USA	Tel: 952 469 5424 Fax: 952 469 4513 E Mail:	红外炉
EcoProgetti Srl	意大利	Via Tasca 127, 35010 San Pietro in Gu (PD), Italy	Tel: 39 049 599 1959 Fax: 39 049 945 9210 E Mail: eco@ecoprogetti.com	硅片、太阳电 池和组件线 整线方案
Energy Equipment Testing Service Ltd (EETS)	英国	Unit 2 Glan-y-Llyn Industrial Estate, Cardiff Road, Taffs Well, CF15 7JD, UK	Tel: 44 29 2082 0910 Fax: 44 29 2082 0911 E Mail: admin@eets.co.uk	电池切割机、 组件测试仪、 层压机
Gebr. Schmid GmbH + Co.	德国	Robert-Bosch-Str. 32-34 72250 Freudenstadt	Tel: 49 7441 538-0 Fax: 49 7441 538-121	加工设备、自 动化设备、硅

		Germany	E Mail: info@schmid-online.de	片、电池和组件制造整线方案
GS Electronic Vertriebs und Service GmbH	德国	Maulkuppenstrasse 2a, D-36043 Fulda, Germany	Tel: 49 661 942 9635 Fax: 49 661 942 9636 E Mail:	太阳能电池制造设备
GT Solar Technologies	美国	243 Daniel Webster Highway, Merrimack, NH 03054, USA	Tel: 1 603 883 5200 Fax: 1 603 598 0444 E Mail: info@gtsolar.com	整线解决方案、分体设备: DDS 炉、串带焊接机、电池测试仪、湿法设备
HCT Shaping Systems	瑞士	Rue de Geneve, 42, 1033 Chesnaux/ Lausanne, Switzerland	Tel: 41 21 731 9100 Fax: 41 21 731 9101 E Mail: sales@hct.ch	线锯
IB Vogt	德国	Helmholtzstrasse 2-9, 10587 Berlin, Germany	Tel: 49 30 397 440 0 Fax: 49 30 397 440 10 E Mail: contact@ib-vogt.com	电池生产线规划和工程
ICOS Vision Systems NV	比利时	Research Park Haasrode, Zone 1 Esperantolaan 8, 3001 Heverlee, Belgium	Tel: 32 16 398 220 Fax: 32 16 400 067 E Mail:	在线监测设备
InnoLas GmbH	德国	Justus-von-Liebig-Ring 8, D-82110 Krailling, Germany	Tel: 49 89 899 360 0 Fax: 49 89 899 360 16 E Mail: info@innolas.com	激光设备
Koenen GmbH	德国	Otto-Hahn-Str. 40, D-85521 Ottobrunn, Germany	Tel: 49 89 608650-0 Fax: 49 89 608650-30 E Mail: info@koenen.de	丝网

Leybold Optics Dresden GmbH	德国	Zur Wetterwarte 50/Haus 303, D-01109, Dresden, Germany	Tel: 49 351 866 9516 Fax: 49 351 8666 9542 E Mail:	真空镀膜设备
M+W Zander Facility Engineering GmbH	德国	Lotterbergstrasse 30, 70499 Stuttgart, Germany	Tel: 49 711 8804 1259 Fax: 49 711 8804 1497 E Mail: photovoltaics@mw-zander.com	整线解决方案
Manz Automation AG	德国	Steigaeckerstrasse 13, D-72768 Reutingen, Germany	Tel: 1 401 295 2150 Fax: 1 401 295 2190 E Mail: info@manz-automation.com	太阳能电池线 自动化设备
Meier Vakuumtechnik GmbH	德国	Vennweg 18, D-46395 Bocholt, Germany	Tel: 49 2871 2460 0 Fax: 49 2871 2460 42 E Mail: info@meier-group.com	层压机
Meyer + Burger AG	瑞士	Alte Bernstrasse 146, PO Box 56, 3613 Steffisberg, Switzerland	Tel: 41 33 439 0505 Fax: 41 33 439 0510 E Mail: sales@meyerburger.ch	线锯
MiniTec Maschinenbau GmbH & Co KG	德国	Nickelsweiher 11, D-66914, Waldmaohr, Germany	Tel: 49 63 73 8127 0 Fax: 49 63 73 81 27 20 E Mail: info@minitec.de	太阳能电池组 件线设备
MRL	美国	MRL Industries, Los Gatos, CA, USA	Tel: 1 408 370 3838 Fax: 1 408 370 0713 E Mail:	管式炉
NPC Incorporated	日本	1-1-20, Minamisenjyu, Arakawa-Ku, Tokyo, 116-0003, Japan	Tel: 81-3-3802-5041 Fax: 81-3-3801-0721 E Mail:	电池生产线 解决方案、电 池分选仪、串 带焊接机、层

				压机、组件模拟器
NPC Europe GmbH	德国	Bruesseler Str, 26, 50674, Cologne, Germany	Tel: 49 221 270 889 0 Fax: 49 221 270 889 10 E Mail: office@npcgroup.net	电池生产线解决方案
Ohmcraft	美国	93 Paper Mill Street, Honeoye Falls, NY 14472	Tel: 1 585-624-2610 Fax: 1 585-624-2692 E Mail: sales@ohmcraft.com	在各种基片上的精确点膏设备
OTB Solar BV	荷兰	Luchthavenweg 10, 5657EB Eindhoven, The Netherlands	Tel: 31 40 2581 581 Fax: 31 40 2509 855 E Mail: info@otb-solar.com	连线太阳能电池生产设备和 PECVD 设备
Panamac Srl	意大利	Via Ca Petofi, 19 36022 Cassola (VI), Italy	Tel: 39 0424 533 693 Fax: 39 0424 531027 E Mail: panamac@nsoft.it	太阳能电池组件制造设备
P.Energy	意大利	Via Poppi 3/1 - 35013 - Cittadella (PD) Italy	Tel: 39 049 9481618 Fax: 39 049 9481618 E Mail: info@penergy.it	太阳能电池组件解决方案、层压机、串带焊接机
RENA Sondermaschinen GmbH	德国	Ob der Eck 5, 78148 Gutenbach, Germany	Tel: 49 7723 9313 0 Fax: 49 7723 9313 50 E Mail: info@rena.de	自动化湿法设备
Roth & Rau AG	德国	Gewerbering 3 + 10, 09337 - Hohenstein-Ernstthal, Germany	Tel: 49 3723 4988 0 Fax: 49 3723 4988 25 E Mail: info@roth-rau.de	太阳能电池整线解决方案、等离子体/薄膜加工
Radiant Technology	美国	1335 South Acacia Avenue,	Tel: 1 714 991 0200	传送、炉子

Corporation (RTC)		Fullerton, CA 92831, USA	Fax: 1 714 991 0600 E Mail: sales@radianttech.com	
Semco Engineering SA	法国	625 Rue de la Croix Verte 34196 Montpellier, France	Tel: 33 4 67 61 09 90 Fax: 33 4 67 52 69 63 E Mail: info@semco-engineering.com	太阳能电池制造解决方案, 低压扩散炉
SierraTherm Production Furnaces Inc	美国	200 Westridge Drive, Watsonville, CA 95076, USA	Tel: 1 (831) 763 0113 Fax: 1 (831) 763 1509 E Mail: tstewart@sierratherm.com	烘干炉、烧结炉、扩散炉
Spire Corporation	美国	One Patriots Park, Bedford, MA 01730-2396 USA	Tel: 1 781 275 6000 Fax: 1 781 275 7470 E Mail: pvsales@spirecorp.com	组件制造和测试设备、解决方案
SPX	美国	100 Millstead Way, Rochester, New York 14624, USA	Tel: 1 585 235 2524 Fax: 1 585 436 2396 E Mail: info@kayex.spx.com	Hamco 和铁磁流体晶体生长设备
Stangl Semiconductor Equipment AG	德国	Ringstarsse 19, 82223 Eichenau, Germany	Tel: 49 8141 3600 0 Fax: E Mail:	湿法设备
Steinbach AG	德国	Westerfeldstrasse 13, D-32758 Detmold, Germany	Tel: 49 52 31 96 07 0 Fax: 49 52 31 96 07 50 E Mail:	层压机胶皮
SunWare GmbH & Co KG	德国	Duesseldorfer Strasse 80 47239 Duisberg, Germany	Tel: 49 2151 406045 Fax: 49 2151 406208 E Mail: info@sunware.de	自动焊接串带机
SVCS	捷克	SVCS s.r.o., Optatova 37, 63700, Czech Republic	Tel: 49 2151 406045 Fax: 49 2151 406208 E Mail: info@svcs.cz	管式炉

Tecnofimes	意大利	Tecnofimes S.r.l., Piazza Podgora 2, 20052 Monza, Milan, Italy	Tel: 39 039 21 40 199 Fax: 39 039 21 47 469 E Mail: info@tecnofimes.com	传送装置、工业炉
Tempress	荷兰	Tempress Systems, Inc., Brugstraat 2, 8181 VH Heerde, The Netherlands	Tel: 31 578 699200 Fax: 31 578 693693 E Mail: sales@tempress.nl	水平扩散炉 和 LPCVD 炉
Unichem Industries	美国	1100 Calle Cordillera San Clemente, CA 92673	Tel: 1 949 361 9999 Fax: 1 949 361 9998 E Mail: info@unichemind.com	丝网印刷机
Vesuvius Group SA	比利时	Mechelsesteenweg 455, Bte 1, 1950 Kraainem, Brussels, Belgium	Tel: 32 2 766 0130 Fax: 32 2 767 13 51 E Mail:	坩埚
Von Ardenne Anlagentechnik GmbH	德国	Plattleite 19/29, 01324 Dresden, Germany	Tel: 49 351 2637 300 Fax: 49 351 2637 308 E Mail: office@vonardenne.biz	太阳能电池等 离子体和电 子束加工设 备

附录 2 AM1.5 光谱辐照度数据


波 长 μm	光谱辐照度 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}, \mu\text{m}^{-1}$	光子流辐照度 $\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$
0.3050	9.5	1.459E+015
0.3100	42.3	6.604E+015
0.3150	107.8	1.709E+016
0.3200	180.9	2.914E+016
0.3250	246.8	4.037E+016
0.3300	395.2	6.565E+016
0.3350	390.0	6.577E+016
0.3400	435.1	7.447E+016
0.3450	438.8	7.620E+016
0.3550	483.6	8.520E+016
0.3600	520.1	9.425E+016
0.3700	666.0	1.241E+017
0.3800	712.3	1.363E+017
0.3900	720.5	1.414E+017
0.4000	1012.8	2.039E+017
0.4100	1157.8	2.390E+017
0.4200	1183.6	2.502E+017
0.4300	1071.5	2.319E+017
0.4400	1301.5	2.883E+017
0.4500	1525.5	3.456E+017
0.4600	1599.0	3.703E+017
0.4700	1580.4	3.739E+017
0.4800	1627.7	3.933E+017

0.4900	1538.6	3.795E+017
0.5000	1548.2	3.897E+017
0.5100	1585.9	4.072E+017
0.5200	1484.4	3.886E+017
0.5300	1571.8	4.194E+017
0.5400	1550.2	4.214E+017
0.5500	1560.9	4.322E+017
0.5700	1501.0	4.307E+017
0.5900	1395.0	4.143E+017
0.6100	1484.8	4.559E+017
0.6300	1433.6	4.546E+017
0.6500	1419.4	4.644E+017
0.6700	1391.8	4.694E+017
0.6900	1129.6	3.925E+017
0.7100	1316.3	4.705E+017
0.7180	1010.0	3.650E+017
0.7244	1042.8	3.803E+017
0.7400	1210.8	4.510E+017
0.7525	1193.4	4.521E+017
0.7575	1175.1	4.481E+017
0.7625	642.9	2.468E+017
0.7675	1030.3	3.981E+017
0.7800	1130.7	4.440E+017
0.8000	1081.2	4.354E+017
0.8160	848.9	3.487E+017
0.8237	784.7	3.254E+017
0.8315	916.1	3.835E+017
0.8400	959.5	4.058E+017
0.8600	978.5	4.236E+017

0.8800	932.9	4.133E+017
0.9050	748.3	3.409E+017
0.9150	667.3	3.073E+017
0.9250	690.1	3.213E+017
0.9300	403.5	1.889E+017
0.9370	258.2	1.218E+017
0.9480	313.5	1.496E+017
0.9650	526.6	2.558E+017
0.9800	646.2	3.188E+017
0.9935	746.5	3.733E+017
1.0400	690.3	3.614E+017
1.0700	637.3	3.433E+017
1.1000	412.4	2.284E+017
1.1200	108.9	6.140E+016
1.1300	189.0	1.075E+017
1.1370	132.1	7.564E+016
1.1610	338.9	1.981E+017
1.1800	459.8	2.731E+017
1.2000	423.4	2.558E+017
1.2350	480.3	2.986E+017
1.2900	412.9	2.681E+017
1.3200	250.1	1.662E+017
1.3500	32.5	2.206E+016
1.3950	1.6	1.123E+015
1.4425	55.7	4.045E+016
1.4625	105.1	7.736E+016
1.4770	105.5	7.843E+016
1.4970	182.0	1.372E+017
1.5200	262.5	2.009E+017

1.5390	274.1	2.214E+017
1.5580	274.9	2.156E+017
1.5780	244.5	1.942E+017
1.5920	247.3	1.982E+017
1.6100	228.6	1.853E+017
1.6300	244.4	2.005E+017
1.6460	234.7	1.945E+017
1.6780	220.4	1.862E+017
1.7400	171.5	1.502E+017
1.8000	30.7	2.782E+016
1.8600	2.0	1.873E+015
1.9200	1.2	1.160E+015
1.9600	21.2	2.092E+016
1.9850	91.1	9.100E+016
2.0050	26.8	2.701E+016
2.0350	99.5	1.019E+017
2.0650	60.4	6.275E+016
2.1000	89.1	9.419E+016
2.1480	82.1	8.883E+016
2.1980	71.5	7.908E+016
2.2700	70.2	8.024E+016
2.3600	62.0	7.369E+016
2.4500	21.2	2.610E+016

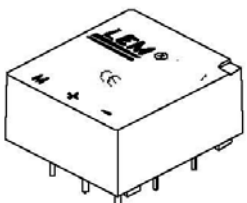
附录 3 LEM 传感器资料



电压传感器 LV28-P

原边与副边之间是绝缘的, 主要用于测量直流、交流和脉冲电压。

$I_{PN} = 10 \text{ mA}$
 $V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$



电 参 数			
I_{PN}	原边额定有效值电流	10	mA
I_P	原边电流测量范围	$0 \dots \pm 14$	mA
R_M	测量电阻	$R_{M \min} \quad R_{M \max}$	
	with $\pm 15 \text{ V}$	$\pm 10 \text{ mA}_{\max}$ $\pm 14 \text{ mA}_{\max}$	100 350 Ω 100 190 Ω
I_{SN}	副边额定有效值电流	25	mA
K_N	转换率	2500 : 1000	
V_C	电源电压 ($\pm 5\%$)	± 15	V
I_C	电流消耗	$10 + I_S$	mA
V_d	有效值电压用于交流绝缘检测 ¹⁾ 50Hz, 1 分钟	2.5	kV

精 度 - 动 态 参 数			
X_G	总精度 @ $I_{PN}, T_A = 25^\circ \text{C}$	± 0.6	%
\mathcal{E}_L	线性度	< 0.2	%
		Typ Max	
I_O	失调电流 @ $I_P = 0, T_A = 25^\circ \text{C}$	± 0.1	mA
I_{OT}	I_O 的温度	± 0.2 ± 0.30	mA
	$0^\circ \text{C} \dots +25^\circ \text{C}$ $+25^\circ \text{C} \dots +70^\circ \text{C}$	± 0.3 ± 0.60	mA
t_T	响应时间 ²⁾ @ 90% of $V_{P \max}$	40	μs

一 般 参 数			
T_A	环境操作温度	$0 \dots +70$	$^\circ \text{C}$
T_S	环境贮存温度	$-25 \dots +85$	$^\circ \text{C}$
R_P	原边线圈电阻 @ $T_A = 70^\circ \text{C}$	250	Ω
R_S	副边线圈电阻 @ $T_A = 70^\circ \text{C}$	110	Ω
m	质量	18	g
	标准 ³⁾	EN 50155	

性能

- 应用霍尔原理的闭环(补偿)电流传感器
- 符合 UL 94-V0 标准的绝缘外壳

使用原则

- 对于电压测量, 原边电流与被测电压的比一定要通过一个由用户选择的外部电阻 R_1 确定, 并串联在传感器原边回路上

优势

- 出色的精度
- 良好的线性度
- 低温漂
- 抗外界干扰能力强
- 共模抑制比强
- 反应时间快
- 频带宽

应用

- 交流变频调速·伺服电机牵引
- 直流电机牵引的静电转换
- 不间断电源 (UPS)
- 电焊机电源
- 电池电源

注意事项

- 当把 LV28-P 焊接在电路板上时, 须用低温烙铁, 焊接时间应尽量短, 否则将有可能造成管脚内部引线开路
- 电路板上安装 LV28-P 的插孔位置必须与 LV28-P 脚尺寸完全吻合, 不能人为挤压管脚, 否则也将可能造成管脚内部引线开路


注释

¹⁾ 原边和副边之间

²⁾ $R_1 = 25 \text{ k}\Omega$ (L/R 常数, 由电阻和原边回路电感系数产生)

³⁾ 备有相应检测清单

52.72.99.000.0C



北京莱姆电子有限公司
空港工业区B区标准厂房1号楼
北京, 中国, 邮编: 101300

网 址: <http://www.lem.com.cn>
<http://www.bjlem.com.cn>
 电子邮件: BJL@lem.com

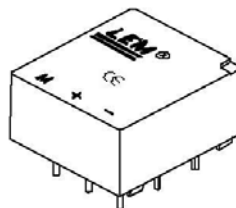
电话: + 86 (10) 80490470
 传真: + 86 (10) 80490473
 24小时热线: + 86 (10) 80490469



多量程电流传感器 LA 28-NP

电流在原边回路和副边回路之间是绝缘的，可用于测量直、交流、脉冲和混合型电流。

$I_{PN} = 5-6-8-12-25\text{ A}$



电参数

I_{PN}	原边额定有效值电流	25	At
I_P	原边电流测量范围	$0 \dots \pm 36$	At
R_M	测量电阻	$R_{M \min}$ $R_{M \max}$	Ω
	with $\pm 15\text{ V}$	$@ \pm 25\text{ At}_{\max}$	
		$@ \pm 36\text{ At}_{\max}$	
I_{SN}	副边额定有效值电流	25	mA
K_N	转换率	1-2-3-4-5 : 1000	
V_C	电源电压 ($\pm 5\%$)	± 15	V
I_C	电流消耗	$10 + I_S$	mA
V_d	有效值交流绝缘电压检测, 50Hz, 1分钟	2.5	kV
V_d	有效值电压分类 ¹⁾ , 安全工作电压	600	V
	绝缘电压	1700	V

特性

- 应用霍尔效应的闭环补偿) 电流传感器
- 绝缘外壳根据 UL 94-V0 的标准

优势

- 出色的精度
- 良好的线性度
- 低温漂
- 优秀的反应时间
- 频带范围宽
- 无插入损失
- 抗干扰能力强
- 电流过载能力

精度-动态参数

X	精度 @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 0.5	%
ϵ_L	线性度	< 0.2	%
I_O	失调电流 ²⁾ @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ ± 0.05 Max ± 0.15	mA
I_{OM}	剩余电流 ³⁾ @ $I_P = 0$, 经过过载之后	± 0.15	mA
I_{OT}	I_O 的温漂	± 0.06 ± 0.25 ± 0.10 ± 0.35	mA
		$0^\circ\text{C} \dots + 25^\circ\text{C}$	
		$+ 25^\circ\text{C} \dots + 70^\circ\text{C}$	
t_r	响应时间 ⁴⁾ @ 90 % of $I_{P\max}$	< 1	μs
di/dt	di/dt 跟随精度	> 50	A/ μs
f	频带宽度 (-1dB)	DC .. 150	kHz

应用

- 交流可变速牵引电机牵引
- 直流电机牵引的静电转换
- 电池电源
- 不间断电源 (UPS)
- 开关电源 (SMPS)
- 电焊机电源

一般参数

T_A	环境操作温度	$0 \dots + 70$	$^\circ\text{C}$
T_S	环境贮存温度	$- 25 \dots + 85$	$^\circ\text{C}$
R_p	每圈的原边电阻 @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	< 1.25	m Ω
R_S	副边线圈电阻 @ $T_{A\max}$	110	Ω
R_{IS}	隔离电阻 @ 500 V, $T_A = 25^\circ\text{C}$	> 1500	M Ω
m	质量	22	g
	标准	EN 50178	

注释
¹⁾ 污染级别 2
²⁾ 连接 15 分钟后开始测量
³⁾ 磁路强磁场的结果
⁴⁾ 100 A/ μs 的 di/dt

52.71.99.000.0C

BJ-LEM



北京莱姆电子有限公司
 空港工业区B区标准厂房1号楼
 北京, 中国, 邮编: 101300



网 址: <http://www.lem.com.cn>
<http://www.bjlem.com.cn>
 电子邮件: BJL@lem.com



电话: + 86 (10) 80490470
 传真: + 86 (10) 80490473
 24小时热线: + 86 (10) 80490469

附录 4. 2005 年 12 月 23 日数据（按最大功率查询）

时间	Siemens			时间	SunPower		
	Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)		Vmp (V)	Imp (A)	Pmax (W)
07:02:06.3	2.226389	0.382276	0.8510951	07:02:04.7	0.786463	0.157978	0.1242439
07:12:32.7	4.523084	0.521286	2.3578204	07:12:32.7	1.93041	0.165877	0.3202106
07:22:57.9	6.702601	0.642919	4.3092295	07:22:56.7	2.693041	0.21327	0.5743449
07:33:21.2	9.069604	0.781929	7.0917864	07:33:22.8	3.908484	0.28436	1.1114165
07:43:46.7	12.092805	0.955691	11.556985	07:43:47.7	5.076263	0.35545	1.8043577
07:54:08.4	17.85798	1.181581	21.10065	07:54:12.7	6.86368	0.458136	3.1444989
08:04:33.7	15.865948	1.198957	19.022589	08:04:37.7	7.459485	0.481833	3.594226
08:14:58.1	14.530115	1.146829	16.663557	08:15:02.8	7.93613	0.49763	3.9492564
08:25:24.2	17.318959	1.181581	20.463753	08:25:27.3	8.460439	0.552923	4.6779713
08:35:33.5	14.951957	2.936577	43.907573	08:35:52.7	8.674929	0.576619	5.0021289
08:46:01.0	15.139442	4.378801	66.292604	08:46:17.6	7.102002	0.576619	4.0951493
08:56:20.5	14.342629	4.986968	71.526232	08:56:42.8	9.771211	0.616114	6.0201799
09:06:45.1	14.553551	5.247611	76.371374	09:07:07.7	11.058151	0.663507	7.3371606
09:17:09.6	13.709866	6.012163	82.425949	09:17:17.0	13.322212	1.658768	22.098459
09:27:34.7	14.225451	5.994787	85.278549	09:27:38.7	16.396568	3.364929	55.173287
09:37:59.3	13.709866	6.481321	88.858042	09:38:03.3	16.468065	3.546603	58.405689
09:48:24.1	13.217717	7.141616	94.395859	09:48:27.9	16.539561	3.791469	62.709233
09:58:49.0	13.381767	7.315378	97.892684	09:58:52.3	16.396568	4.012638	65.793492
10:09:14.0	13.522381	7.576021	102.44584	10:09:17.2	16.4204	4.186414	68.742592
10:19:38.8	13.123975	7.906169	103.76036	10:19:42.0	16.372736	4.320695	70.741599
10:30:03.7	12.795875	8.21894	105.16853	10:30:06.7	16.348904	4.470774	73.092255
10:40:28.6	12.280291	8.635969	106.05221	10:40:31.4	15.872259	4.723539	74.973234
10:50:53.8	13.030232	8.253692	107.54752	10:50:56.2	15.729266	4.849921	76.285697
11:01:18.6	12.44434	8.653345	107.68517	11:01:21.3	15.872259	4.881517	77.480702
11:11:43.5	11.858449	9.08775	107.76662	11:11:46.2	15.99142	4.873618	77.936072
11:22:08.4	11.717835	9.226759	108.11764	11:22:10.8	15.276454	5.181675	79.15762
11:32:33.6	12.60839	8.670721	109.32383	11:32:35.8	15.538608	5.197472	80.76148
11:42:58.7	12.77244	8.496959	108.5269	11:43:00.9	15.586273	5.150079	80.270537
11:53:23.5	12.233419	8.774978	107.34798	11:53:25.9	15.633937	5.14218	80.392518
12:03:48.6	12.256855	8.601216	105.42386	12:03:50.7	15.157293	5.300158	80.336048
12:14:13.6	12.60839	8.375326	105.59938	12:14:15.8	15.371783	5.221169	80.258677
12:24:38.4	11.389735	9.226759	105.09034	12:24:40.7	15.13346	5.205371	78.775274
12:35:03.6	12.327162	8.635969	106.45699	12:35:05.7	15.252622	5.189573	79.154595
12:45:28.5	11.74127	9.08775	106.70173	12:45:30.5	14.799809	5.402844	79.961059
12:55:53.5	11.530349	9.000869	103.78316	12:55:55.6	14.585319	5.323855	77.650123
13:06:18.7	12.256855	8.375326	102.65516	13:06:20.9	15.324118	5.063191	77.588936
13:16:43.4	11.0382	9.244136	102.03862	13:16:45.9	14.895138	5.055292	75.299272

13:27:08.5	11.764706	8.514335	100.16865	13:27:11.0	15.13346	4.881517	73.874242
13:37:33.8	12.561519	7.99305	100.40485	13:37:36.3	15.371783	4.723539	72.609217
13:47:58.7	11.928756	8.21894	98.04173	13:48:01.2	14.91897	4.71564	70.352492
13:58:23.6	11.74127	8.21894	96.500794	13:58:26.2	14.966635	4.612954	69.040399
14:08:48.9	12.60839	7.541268	95.083248	14:08:51.6	15.109628	4.407583	66.59694
14:19:13.8	11.999063	7.784535	93.407126	14:19:16.9	15.419447	4.218009	65.039366
14:29:38.8	11.999063	7.541268	90.48815	14:29:42.2	15.610105	4.044234	63.130917
14:40:04.1	12.749004	6.863597	87.504026	14:40:07.6	16.015253	3.767773	60.341838
14:50:29.2	12.77244	6.655083	85.001648	14:50:33.1	16.158246	3.601896	58.200322
15:00:54.4	12.819311	6.324935	81.081309	15:00:58.2	15.633937	3.459716	54.088982
15:11:19.5	12.795875	6.081668	77.820264	15:11:23.7	15.967588	3.246445	51.837896
15:21:44.9	13.47551	5.38662	72.587452	15:21:49.6	16.277407	2.946288	47.957929
15:32:11.0	14.202015	4.205039	59.720027	15:32:15.0	15.99142	2.78831	44.589036
15:42:37.8	14.623858	3.19722	46.755691	15:42:41.1	16.539561	2.535545	41.936801
15:53:07.1	14.905086	1.980886	29.525276	15:53:06.8	15.896092	2.330174	37.04066
16:03:38.9	13.756738	1.268462	17.449899	16:03:34.2	16.444233	1.943128	31.95325
16:14:05.9	13.920787	1.181581	16.448537	16:14:01.3	16.491897	1.690363	27.877292
16:24:34.4	14.389501	0.990443	14.251981	16:24:37.7	9.199237	0.600316	5.5224492
16:35:00.7	13.780173	0.973067	13.409032	16:35:02.8	7.840801	0.513428	4.0256868
16:45:26.6	12.44434	0.886186	11.028	16:45:27.2	6.458532	0.42654	2.7548222
16:55:52.8	11.178814	0.816681	9.129525	16:55:51.7	5.409914	0.387046	2.0938856
17:06:16.3	8.905554	0.747176	6.6540162	17:06:17.9	4.575786	0.323855	1.4818912
17:16:41.7	6.866651	0.660295	4.5340153	17:16:42.3	3.312679	0.268562	0.8896597
17:27:07.1	4.734005	0.486533	2.3032497	17:27:07.9	2.1449	0.173776	0.3727321
17:37:28.8	2.507617	0.486533	1.2200384	17:37:31.9	1.191611	0.118483	0.1411856
17:47:56.7	1.429576	0.347524	0.496812	17:47:53.3	0.548141	0.094787	0.0519566
17:58:12.7	0.86712	0.417029	0.3616142	17:58:02.7	0.357483	0.078989	0.0282372